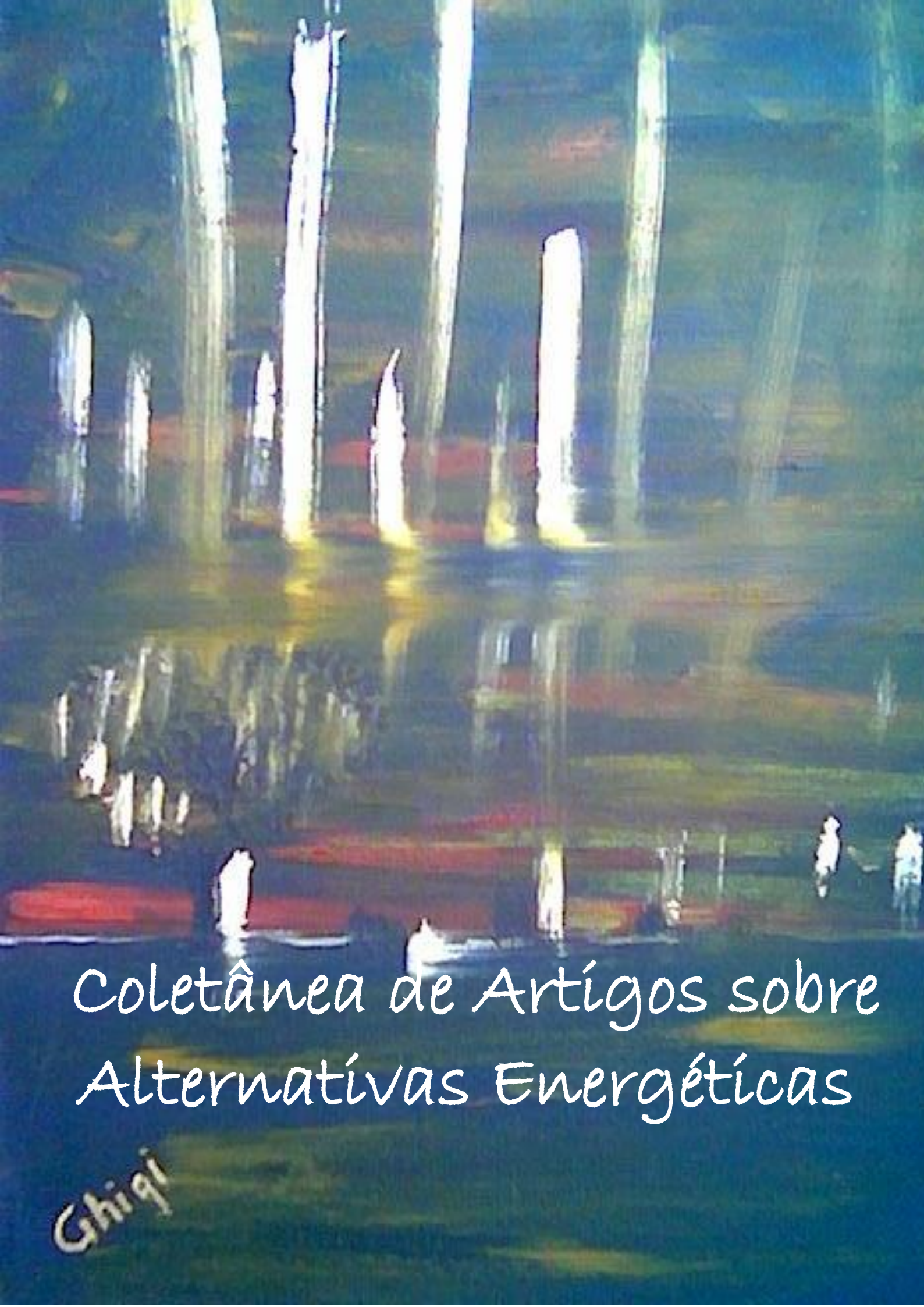

Coletânea de Artigos sobre
Alternativas Energéticas
Ghigi

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG

COLETÂNEA DE ARTIGOS SOBRE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS

BELO HORIZONTE (MG) – BRASIL
2016

Copyright: Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig
Diretor-Presidência
Mauro Borges Lemos
Diretor-Vice Presidente
Paulo Roberto Castellari Porchia
Superintendência de Tecnologia, Inovação e Eficiência Energética
Carlos Renato França Maciel
Gerência de Estudos Tecnológicos e Alternativas Energéticas
Ricardo Luiz Jardim Carnevalli

Organizadores:
Cláudio Homero Ferreira da Silva, *D. Sc.*
Luana Teixeira Costa Lana

Capa:
Luiz Renato Gomes

Edição e Produção:
Gerência de Estudos Tecnológicos e Alternativas Energéticas

Companhia Energética de Minas Gerais.
Coletânea de artigos sobre alternativas energéticas [livro eletrônico] / Organizadores: Cláudio Homero Ferreira da Silva, Luana Teixeira Costa Lana. – Belo Horizonte: Cemig, 2016.

20 MB; ePUB.
ISBN 978-85-87929-63-1

1. Energia - Fontes alternativas - Brasil. 2. Recursos energéticos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Silva, Cláudio Homero Ferreira da, org. II. Lana, Luana Teixeira Costa, org. III. Título.

CDD: 620.91

Disponível *online* em:

<http://www.cemig.com.br/Inovacao/AlternativasEnergeticas>
<http://cemig20/Inovacao/AlternativasEnergeticas>
Este livro faz parte dos estudos realizados dentro do P&D Cemig/Aneel GT 0553.

APRESENTAÇÃO

Em 2015 surgiu a ideia de realizar uma publicação que apresentasse um panorama geral dos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que foram realizados dentro do Programa de P&D da Cemig.

Tal publicação foi realizada sob o título de "Uma Breve Reflexão sobre Alternativas Energéticas".

Essa publicação apresenta um breve panorama do setor energético brasileiro, juntamente com os potenciais em energia renovável no Brasil e no estado de Minas Gerais. Na sequencia, discute-se brevemente sobre os Projeto de P&D realizado no âmbito do Programa regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. E então parte-se para uma breve apresentação individual dos projetos Cemig, com uma ilustração que sintetiza o desenvolvimento realizado juntamente com a descrição dos principais resultados. Este livro encerra-se com um balanço consolidado dos resultados dos projetos realizados pela Cemig.

A ideia nesse caso era de explorar apenas um resumo dos projeto com foco em seus resultados e benefícios, criando um panorama completo sobre o que a Cemig fez no tema de Fontes Alternativas, desenvolvido dentro da Gerência de Alternativas Energéticas.

A tarefa foi relativamente fácil, uma vez que todos os projetos realizados tiveram suas publicações, principalmente em eventos como o Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL.

Com o livro resumia de consolidava esses resultados, tais artigos foram indicados como referências para consultas posteriores, para aqueles leitores que quisessem se aprofundar nos assuntos e projetos descritos. Entretanto, percebeu-se uma certa dificuldade de acesso, uma vez que para a maiorias dos artigos não bastava uma simples pesquisa na internet para encontra-los. Desta forma, percebeu-se uma oportunidade para criar essa coletânea, de forma a disponibilizá-la junto com o e-book "Uma Breve Reflexão sobre Alternativas Energéticas". Essa iniciativa também teve como consequência uma gestão do conhecimento nos projetos de P&D realizados em Alternativas Energéticas.

Oportunamente agradeço a co-organizadora deste Livro, Luana Teixeira Costa Lana, pelo trabalho e apoio.

Cláudio Homero Ferreira da Silva, *DSc.*

SUMÁRIO

Capítulo 1: Aspectos e Desafios da Energia Renovável no Brasil 13
1.1 Introdução 13
1.2 Fontes renováveis e seus desafios 14
1.3 Vetor energético - Hidrogênio 17
1.4 Matriz atual e perspectivas 18
1.5 Pesquisa e Desenvolvimento 20
1.6 Conclusão 30

Capítulo 2: Implantação de Fontes Alternativas de Energia Usando a Gestão da Informação para Apoio ao Processo de Decisão 32
2.1 Introdução 32
2.2 Desenvolvimento da Pesquisa 33
2.3 Resultados Preliminares: Modelo Econômico Financeiro 37
2.4 Algumas Questões Sobre o Gerenciamento do Projeto 55
2.5 Modelo de Apoio a Decisão e Levantamento de Informações Preliminares para a Gestão da Informação 56
2.6 Considerações Finais 61

Capítulo 3: Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída 63
3.1 Introdução 63
3.2 P&D CEMIG/ANEEL 001 64
3.3 Resultados Obtidos 65
3.4 Direções para Pesquisa 77
3.5 Conclusões 78

Capítulo 4: Desenvolvimento de Modelo para Iniciativas de Inclusão Digital Utilizando Tecnologia *Power Line Communication* de Banda Larga 81
4.1 Introdução 81
4.2 Desenvolvimento da Pesquisa 82
4.3 Resultados 109
4.4 Conclusões 111

Capítulo 5: Estabelecimento de proposta metodológica para elaboração do balanço energético do estado de Minas Gerais 114
5.1 Introdução 114
5.2 Desenvolvimento da Pesquisa 116
5.3 Resultados 122
5.4 Conclusões 124

Capítulo 6: Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico 126

6.1 Introdução 126
6.2 Tipos de Células 126
6.3 Células de Polímero Condutor Iônico 129
6.4 Projeto CEMIG/ANEEL-008 130
6.5 Fases do Projeto 130
6.6 Conclusões 131

Capítulo 7: Aplicações de Nanotubos de Carbono em Membranas de Troca Protônicas para Células Combustíveis 134
7.1 Introdução 134
7.2 Desenvolvimento da Pesquisa 136
7.3 Resultados Obtidos 139
7.4 Conclusões 163

Capítulo 8: Desenvolvimento de Membrana Polimérica para Células a Combustível 165
8.1 Introdução 165
8.2 Desenvolvimento da Pesquisa 167
8.3 Resultados 184
8.4 Discussão dos Resultados 185
8.5 Conclusões 187

Capítulo 9: Desenvolvimento de Catalisadores para a Reforma de Biomassa e produção de Hidrogênio 190
9.1 Introdução 190
9.2 P&D GT 288 – Reforma de Biomassa 191
9.3 Desenvolvimento de Catalisadores [9] 194
9.4 Potencial Técnico-Econômico [11] 204
9.5 Conclusões 212

Capítulo 10: Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W 214
10.1 Introdução 214
10.2 P&D CEMIG/ANEEL Nº 097 216
10.3 Laboratório de Materiais e Pilha a Combustível 223
10.4 Resultados e Discussões 227
10.5 Conclusões 232

Capítulo 11: Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW 234
11.1 Introdução 234
11.2 Desenvolvimento da Pesquisa 237
11.3 Conclusão 257

Capítulo 12: Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético 259
12.1 Introdução 259
12.2 P&D CEMIG/ANEEL 050 260
12.3 Resultados Obtidos 260
12.4 Conclusões 276

Capítulo 13: Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Operação Experimental 279
13.1 Introdução 279
13.2 P&D CEMIG/ANEEL Nº 181 280
13.3 Resultados Obtidos 284
13.4 Conclusões 295

Capítulo 14: Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Análise Cromatográfica 297
14.1 Introdução 297
14.2 Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio 298
14.3 Análise Cromatográfica 302
14.4 Resultados Obtidos 309
14.5 Conclusões 319

Capítulo 15: Produção de Hidrogênio Através de Reforma de Etanol 321
15.1 Introdução 321
15.2 P&D CEMIG/ANEEL 108 322
15.3 Resultados Obtidos 323
15.4 Conclusões 337

Capítulo 16: Produção de biodiesel para geração de energia elétrica em microturbinas e motores estacionários 340
16.1 Introdução 340
16.2 P&D CEMIG/ANEEL Nº 141 342
16.3 Produção de Biodiesel 346
16.4 Laboratório de Produção de Biodiesel: Resultados 352
16.5 Conclusões 357

Capítulo 17: Sistema de Injeção Eletrônica de Hidrogênio para um Motor Diesel Estacionário 360
17.1 Introdução 360
17.2 Desenvolvimento da Pesquisa: P&D GT 292 361
17.3 Central Eletrônica de Injeção de Hidrogênio 364
17.4 Testes da Central Eletrônica de Injeção de Hidrogênio em um Grupo Motor-Gerador 377
17.5 Resultados e Discussão 386
17.6 Conclusões 389

Capítulo 18: Desenvolvimento do Conjunto Motogerador Movido a Álcool Etílico Hidratado 392
18.1 Introdução 392
18.2 Projeto de P&D CEMIG/ANEEL Nº 141 394
18.3 Metodologia 394
18.4 Descrições e Avaliações Sobre os Principais Componentes do Conjunto Motogerador 396
18.5 Resultados: Principais Testes 404
18.6 Avaliação do Sistema de Controle de Rotação 407
18.7 Discussão 407
18.8 Conclusões 408

Capítulo 19: Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling ... 410
19.1 Introdução 410
19.2 P&D CEMIG/ANEEL 123 411
19.3 Resultados Obtidos 412
19.4 Conclusões 427

Capítulo 20: Sistema para Cálculo do Potencial de Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas e Termoelétricas Solares de Grande Porte 430
20.1 Introdução 430
20.2 Desenvolvimento da Pesquisa 432
20.3 Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais 438
20.4 Conclusões 449

Capítulo 21: Aquecimento Solar Distrital para Habitações de Interesse Social 451
21.1 Introdução 451
21.2 Estudo de Indicadores Arquitetônicos 452
21.3 Estudo de Indicadores Sociais 454
21.4 Indicadores Técnicos de Qualidade 456
21.5 *Software*: Distrital Solar 460
21.6 Conclusões 464

Capítulo 22: Otimização da Eficiência Elétrica de Módulos Fotovoltaicos Através do Acoplamento de Trocadores de Calor Tipo Tubo-Aleta 466
22.1 Introdução 466
22.2 Desenvolvimento da pesquisa 468
22.3 Resultados 481
22.4 Conclusão 483

Capítulo 23: Sistema Frigorífico Por Absorção de Vapor Acionado Por Energia Solar 486
23.1 Introdução 486
23.2 Desenvolvimento da Pesquisa 489

23.3 Análise para Sistema de Refrigeração Operando em Diferentes Condições de Carga 497
23.4 Avaliação Econômica do Sistema 505
23.5 Montagem Final da Máquina de Refrigeração por Absorção de Vapor 507
23.6 Comentários e Conclusões 509

Capítulo 24: Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: abordagem econômica e ambiental 511
24.1 Introdução 512
24.2 Desenvolvimento da Pesquisa 513
24.3 Estudo de Caso em Aterros de MG. 523
24.4 Avaliação Ambiental 527
24.5 Conclusões 532

Capítulo 25: Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico 534
25.1 Introdução 534
25.2 Desenvolvimento da Pesquisa 535
25.3 Conclusões 555

Capítulo 26: Desenvolvimento de um sistema de purificação do biogás visando a geração de energia elétrica a partir da metanização da vinhaça.. 557
26.1 Introdução 557
26.2 Desenvolvimento da Pesquisa 559
26.3 Resultados 571
26.4 Conclusões 577

Capítulo 27: Geração Termelétrica Descentralizada para o Setor Siderúrgico 579
27.1 Introdução 579
27.2 P&D GT Nº 185 580
27.3 Resultados [8] 582
27.4 Conclusões 591

Capítulo 28: Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica usando microturbinas 594
28.1 Introdução 594
28.2 Desenvolvimento da Pesquisa 596
28.3 Resultados Preliminares e Discussão 610
28.4 Conclusões 621

Capítulo 29: Potencial dos Resíduos da Colheita Florestal e Resíduos da Carbonização para a Produção de Energia 624
29.1 Introdução 624
29.2 Desenvolvimento da Pesquisa 625

29.3 Metodologia 626
29.4 Resultados e Discussão 631
29.5 Protótipo de Cogeração e Aproveitamento de Biomassa Residual 645
29.6 Benefícios e Dificuldades 648
29.7 Conclusões 649

Capítulo 30: Desempenho de um Sistema Industrial de Transporte de Gases da Carbonização para a Cogeração de Energia Elétrica 652
30.1 Introdução 652
30.2 Desenvolvimento da Pesquisa 653
30.3 Metodologia do Projeto 654
30.4 Resultados e Discussão 661
30.5 Conclusões 673

Capítulo 31: Gaseificação de Biomassa para Acionamento de Células a combustível do tipo SOFC 675
31.1 Introdução 675
31.2 Desenvolvimento da Pesquisa 677
31.3 Resultados Experimentais e Discussão. 689
31.4 Conclusões. 697

Capítulo 32: Aerogeradores de Pequeno Porte Adaptados a regimes de ventos turbulentos e conectáveis em redes elétricas fracas 701
32.1 Introdução 701
32.2 Metodologia do Projeto da Turbina Eólica 702
32.3 Determinação do Sistema de Geração Elétrica 705
32.4 Caracterização do Regime de Ventos 708
32.5 Especificação Básica do Protótipo 709
32.6 Conclusões 711

Referências 713

Capítulo 1

Capítulo 1: Aspectos e Desafios da Energia Renovável no Brasil[1]

Resumo: Em tempos de crises climáticas e econômicas, alternativas renováveis de energia aparecem como solução, ou esperança, para os problemas desencadeados por tais crises. Conhecer as fontes renováveis de energia e, entender os desafios relacionados à mesma, permite criar um senso crítico mais aguçado, e se apresenta como uma necessidade à todos os cidadãos, por representar um futuro próximo e promissor para a consolidação da sustentabilidade no setor energético. Este texto apresenta quais as fontes atualmente estudadas, dentro do âmbito renovável, e os desafios enfrentados; a atual situação da matriz energética e elétrica brasileira, considerando suas perspectivas futuras; e ainda, o resumo geral do livro que acolhe este e todos os trabalhos envolvidos em projetos de pesquisa e desenvolvimento, da Cemig em parceria com outras instituições dentro do contexto das Alternativas Energéticas.

1.1 Introdução

A necessidade de estudos relacionados ao potencial energético brasileiro têm aumentado cada vez mais, considerando o crescimento do país, populacional e economicamente, e considerando as questões ambientais correlacionadas à este setor.

O Brasil é um país de grande extensão territorial, considerado, segundo [21], como "a unidade geopolítica de maior dimensão territorial da América do Sul e Central, a terceira maior do conjunto continental americano e a quinta maior do mundo". Conforme observado em mapas disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o Brasil está localizado entre o equador e o trópico de capricórnio, permitindo características diversas e clima favorável ao desenvolvimento de inúmeras espécies. Além disso, seu posicionamento no globo terrestre favorece a irradiação solar incidente, o que contabiliza como mais um potencial deste país. Outras potencialidades podem ser citadas, ventos fortes e aproveitáveis, grande extensão costeira e inúmeros cursos de rios [24] [21].

Considerando todo potencial apresentado, sabe-se que o Brasil é considerado um país de grandes recursos naturais, sendo reconhecido por possuir mais da metade de sua matriz elétrica sustentada por fonte renovável [2].

Torna-se importante entender a diferenciação entre fonte renovável e fonte não renovável de energia. A primeira trata-se daquelas em que, o tempo de reposição da fonte é menor ou igual ao tempo em que a mesma é utilizada. [14] complementam, "Energia renovável é uma expressão usada para descrever uma ampla gama de fontes de energia que são disponibilizadas na natureza de forma cíclica".

[1] LANA, L.T.C.; SILVA, C. H. F. da;.

A fonte não renovável, de maneira comum, é representada pelos combustíveis fósseis. Ora, utilizando do mesmo raciocínio anterior, o tempo de reposição de uma jazida de petróleo não é, nem próximo, do tempo de sua utilização. Ou seja, além do mesmo ser altamente poluente ao meio ambiente, não pode ser reposto ao mesmo, em tempo factível.

1.2 Fontes renováveis e seus desafios

Dentro do contexto apresentado, as fontes renováveis podem ser: solar, eólica, hidráulica e da biomassa.

Os desafios relacionados à tais fontes são diversos e inerentes às mesmas, porém, as questões relacionadas à viabilidade econômica são semelhantes. [14] não estão desatualizados em dizer que: "as fontes renováveis de energia necessitam obrigatoriamente de recursos públicos, seja para pesquisa e desenvolvimento, seja para subsidiar os custos iniciais de produção."

Mesmo diante de obstáculos, a inserção das fontes renováveis na matriz energética do país, e do mundo, torna-se cada vez mais necessária. Tal ação implicaria na diversificação da mesma e, consequentemente, no aumento da segurança energética, o que é "particularmente importante em um contexto de alta volatilidade de preço do petróleo" [14].

A. Solar

Primeiramente, de acordo com [52], o Brasil conta com grande quantidade de radiação solar diária, sendo que "as áreas localizadas no Nordeste do Brasil, têm valores da radiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões do mundo".

Tal potencial pode ser aproveitado, de diversas maneiras, para a produção de energia térmica ou elétrica. Utiliza-se, desde células fotovoltaicas (diferentes materiais), coletores solar plano, até coletores (espelhos) concentradores da luz solar (para térmica de elevadas temperaturas).

A tecnologia solar térmica, de baixa e média temperaturas, emprega os coletores solares, constituídos por placas que permitem a absorção da luz solar, tubos internos que transportam o fluído que será aquecido e tanque para armazenar o mesmo [11]. O funcionamento do sistema baseia-se na absorção da energia solar, e transferência do calor da placa ao fluído (água ou outro), e armazenagem deste. O líquido aquecido, caso seja a água, pode ser utilizado diretamente ou, em sistemas que permitem maiores temperaturas, utilizado para fins industriais.

Unindo o aproveitamento térmico com o elétrico, os coletores solar concentradores permitem o aquecimento da água em altas temperaturas, podendo, esta, ser utilizada para produção de energia elétrica. Esta produção utiliza do sistema convencional termoelétrico de transformação, utilizando turbina a vapor, um gerador e outros equipamentos [11].

Já a tecnologia solar fotovoltaica, utiliza células fotovoltaicas ou células solares, constituídas de silício (cristalino, policristalino ou amorfo). A conversão de energia solar em energia elétrica é dada pelo fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. Este leva em consideração que a luz é constituída por pacotes de energia, fótons, e, quando os mesmos entram em contato com o material da placa, libera elétrons que são conduzidos e formando-se a corrente elétrica. De acordo com o apresentado pelo Atlas solarimétrico [10], a eficiência máxima teórica de uma célula de silício monocristalino é de 22%, sendo 19% considerando um módulo.

Alguns desafios relacionados à esta fonte de energia são: elevado preço dos componentes do painel solar fotovoltáico; ausência da detenção da tecnologia de fabricação do painel, pelo Brasil; poucos financiamentos e incentivos que viabilizam a utilização da energia solar fotovoltaica.

B. Eólica

Define-se como energia eólica, aquela que aproveita do potencial energético contido no vento, calculado a partir da energia cinética, para movimentar pás (energia mecânica) e, por meio de turbinas eólicas, convertê-la em energia elétrica. O sistema que executa tais conversões é constituído por torre, tubular cônica ou treliçada, pás aerodinâmicas, cubo das pás, eixo e nacele. Esta última comporta todo o sistema de geração de energia elétrica, sendo por isto responsável a caixa de engrenagem, unidade hidráulica, freio, unidade de controle e gerador [15].

O aumento da procura por equipamentos deste sistema, de acordo com a lei de oferta e demanda, provocou a industrialização do setor e, um ambiente de concorrência, que permitiu a redução dos custos de produção e montagem dos mesmos. Outros aspectos vêm colaborando com a expansão desta tecnologia, como característica modular, redução gradual dos custos de geração, não necessidade de desapropriação de terras (baixa taxa de ocupação) [2] e ausência de demanda de água para resfriamento ou limpeza. Com isso, a energia eólica vem se consolidando como uma das mais competitivas fontes de energia alternativa [11].

Concomitante ao crescimento e desenvolvimento da tecnologia, tem-se o surgimento dos problemas e impasses ambientais. Primeiramente, faz-se necessário pensar em uma logística de transporte dos componentes do sistema. [4]. Atualmente o mesmo é realizado por rodovias, ou seja, além de moroso, pelo tamanho dos componentes do sistema, ainda envolve o uso de combustíveis fósseis.

Apesar das soluções irem aparecendo à medida em que a tecnologia vai se desenvolvendo, a sua expansão ainda depende de investimentos e pesquisas de inúmeros teores.

C. Hidráulica

Conhecida desde os primórdios da humanidade, a energia hídrica, ou seja, produzida pela força da água, vem acompanhando a evolução do homem e o desenvolvimento das localidades em que está inserida.

Atualmente, responsável por 64% da geração de energia elétrica do Brasil [19], é ainda uma das fontes mais rentáveis do ramo energético.

[32] resume que "Em uma central hidrelétrica, a água aciona uma turbina hidráulica que movimenta o rotor de um gerador elétrico para produção de energia elétrica." Essa água pode ser proveniente do curso natural do rio, ou de um reservatório construído no curso do mesmo, vai depender do tipo de aproveitamento hidroelétrico que está sendo utilizado.

O empreendimento pode ser enquadrado como Pequena Central Hidrelétrica – PCH, que, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, significa:

> (...) aqueles empreendimentos destinados a autoprodução ou produção independente de energia elétrica, cuja potência seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área de reservatório de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio (ANEEL, 2015).

Aqueles empreendimentos que não se enquadram como PCH, podem ser classificados como Centrais Geradoras Hidrelétricas – CGH (potência instalada menor que a PCH); Usina Hidrelétrica de Energia – UHE (mais de 30 MW de potência instalada) [23] [17].

Observa-se que tal fonte é extremamente dependente dos sistemas de chuva e enchimento de rios e, com a última crise hídrica, determinou-se a necessidade de diversificar a matriz elétrica, para que os riscos relacionados à cenários climáticos como esses não afetassem a disponibilidade e o fornecimento da energia elétrica.

Contudo, a diversificação iniciou-se pela construção de usinas sem reservatórios, ou seja, que não realizam a regularização da vazão, nem mesmo o armazenamento da água (energia em potencial). Tais empreendimentos são menos poluentes do que as usinas hidrelétricas entretanto, por não garantirem minamamente o fornecimento de energia elétrica, incentivam a construção e funcionamento de sistemas térmicos poluentes.

Além disso, outros impactos estão relacionados ao aproveitamento hídrico, sendo o principal desafio, atualmente, a construção de empreendimentos, de pequeno ou grande porte, causando o menor impacto socioambiental possível.

D. Biomassa

No contexto de recursos renováveis, biomassa é considerada todo material orgânico originado por recentes atividades biológicas (animal ou vegetal). Desta maneira, os combustíveis fósseis são excluídos desta gama, e os resíduos orgânicos, compreendendo os Resíduos Sólidos Orgânicos – RSO do município, agrícolas, florestais e de outros processos, passam a compô-la [2].

Atualmente, existem diversas formas e tecnologias para o processo de conversão, ou aproveitamento energético, da biomassa. A começar pela simples combustão,

relacionada ao ciclo a vapor, passando por biodigestão, gaseificação, pirólise lenta ou rápida, produção de briquetes (compactação da biomassa), e outras.

Tais tecnologias podem gerar combustíveis (energia potencial), nos três estados físicos da matéria (sólido, líquido ou gasoso), ou energia elétrica. Tal fator é uma vantagem, considerando que os métodos de aproveitamento podem variar de acordo com o desenvolvimento tecnológico local e com a biomassa disponível, ou seja, é uma fonte renovável e descentralizada [12].

1.3 Vetor energético - Hidrogênio

Diferentemente das fontes energéticas, o hidrogênio é conhecido como um vetor energético, ou seja, não é fonte primária de energia. De acordo com a [11], vetores energéticos são "elementos ou moléculas capazes de "armazenar, transportar e fornecer" energia sem, contudo, ser fonte de energia".

Este vetor, ainda em desenvolvimento, apresenta-se com potencial promissor para as próximas gerações. Apesar do hidrogênio ser encontrado de forma abundante, em todo o universo, o hidrogênio livre (puro) é escasso, ou seja, está sempre ligado à outro elemento. Na Terra, a combinação química ocorre com o oxigênio, formando a água. Ainda assim, o hidrogênio é promissor por poder ser obtido de diversas fontes [30].

Suas propriedades são: inodoro e incolor, altamente comburente, baixa densidade (14 vezes menor que o ar), e possui poder calorífico de 141,9 MJ/kg (maior energia por unidade de massa comparado aos combustíveis conhecidos) [30].

De acordo com [51], o hidrogênio será utilizado em células a combustível para gerar energia, e poderá ser "obtido a partir de uma ampla variedade de combustíveis (gás natural, GLP, propano, metanol, etanol, etc.) utilizando principalmente a reforma catalítica.". Tais células podem receber o hidrogênio diretamente, no caso de "obtido, por exemplo, da eletrólise da água ou de processos químicos que tenham hidrogênio puro como subproduto".

Constata-se que, a obtenção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, não contribuiria com a redução da emissão de gases de efeito estufa, nem mesmo seria considerado fonte renovável. Todavia, tal vetor energético apresenta grande flexibilidade de obtenção, podendo ser utilizados os derivados das biomasas, obtidos pelo processo de gaseificação e pirólise. Além disso, pode-se realizar a eletrólise da água, sendo a energia para tal, fornecida por outros recursos renováveis, como a energia solar, eólica, hidráulica (quando for viável) [30].

Os principais desafios relacionados á este recurso são: a viabilização da obtenção do hidrogênio; o desenvolvimento da tecnologia, principalmente da membrana polimérica (presente na célula a combustível); o armazenamento do hidrogênio obtido (considerando seu tamanho molecular e baixa densidade), entre outros.

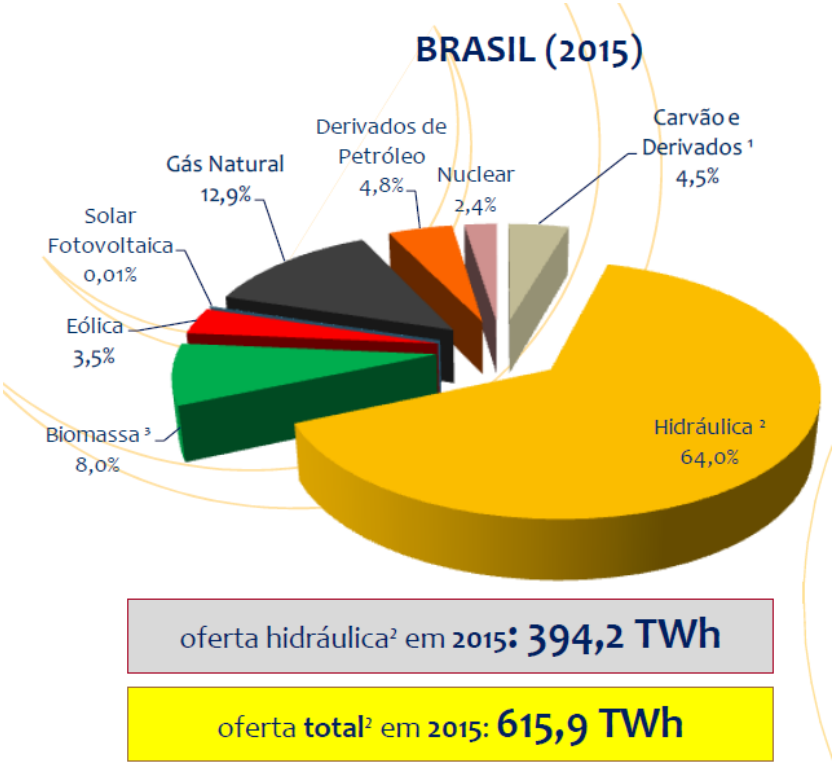
1.4 Matriz atual e perspectivas

Dentro do contexto que será apresentado neste item, torna-se válido ressaltar o significado de alguns termos. Matriz elétrica baseia-se nas fontes utilizadas para a produção de energia elétrica, enquanto matriz energética relaciona-se aos recursos capazes de produzir energia, em suas várias formas de manifestação [11]. A energia disponível para consumo, considerando o balanço entre aquela produzida pelo país, a importada e a exportada, é conhecida como oferta de energia. Já a oferta interna de energia restringe-se à demanda interna do país [18].

A matriz elétrica brasileira foi sempre representada, em sua maioria, por fontes renováveis de energia. Nos últimos dois anos, no entanto, considerando o acionamento de termelétricas para compensação da baixa oferta de energia hidráulica, a participação de tais fontes foi reduzida.

Ainda assim, observa-se, pela Figura 1, a presença da energia renovável, no contexto elétrico, respondendo por mais de 50% da produção da mesma. O que não ocorre em relação à matriz energética do país, considerando sua representatividade, demonstrada pela Figura 2, de 42,8% [19] [20].

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira [19] [20].



[1]Inclui gás de coqueria [2]Inclui importação[3]Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras fontes primárias.

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira [20].

Considera-se a necessidade de diversificar as matrizes do Brasil por motivos diversos, como a diminuição da dependência dos recursos hídricos (para a eletricidade) e dos combustíveis fósseis (para a disponibilidade de energia); redução da emissão de gases de efeito estufa, causadores do aquecimento global; possibilitar o acesso à energia elétrica em locais remotos; entre outros.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia, [29], as perspectivas para a expansão da representatividade da energia renovável são positivas. A previsão é para a:

> (...) continuidade da forte presença das fontes renováveis na matriz energética brasileira, de 45,2% em 2024, indicador superior ao verificado em 2014, de 39,3%. Na matriz de geração de energia elétrica, as renováveis deverão representar perto de 86% em 2024, superando a atual predominância destas fontes. Destaque para a energia eólica, que dos atuais 2% da matriz elétrica deverá passar a 8% em 2024, devido à expansão de 20 GW no período (MME/EPE, 2015, p.V).

As contribuições da inserção de fontes renováveis na matriz energética Brasileira são inúmeras, e por mais que já foram minimamente abordadas neste capítulo, ressaltá-las é necessário. Além de melhorar a garantia, ou diminuir o risco, inerente ao abastecimento energético, "a maior participação (...) garante melhor condição ambiental e de saúde à população" [14]. Os mesmos autores acrescentam os seguintes benefícios, considerando o cenário em países em desenvolvimento:

> (...) as fontes renováveis contribuem para a diversificação da matriz energética e auxilia o desenvolvimento local. Em áreas rurais, as fontes renováveis apropriadas a esse contexto podem contribuir de forma mais incisiva para o desenvolvimento econômico, melhorando a produtividade na agricultura, reduzindo as desigualdades regionais, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população, notadamente nos campos da saúde e educação, permitindo a melhoria dos meios de comunicação e reforçando a capacidade de produção na região com melhor infra-estrutura (COSTA & PRATES, 2005, p. 17).

1.5 Pesquisa e Desenvolvimento

Os projetos de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D, desenvolvidos pelas concessionárias de energia elétrica, e regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, são responsáveis por alavancar o mercado das energias renováveis, permitindo novos investimentos e o desenvolvimento de novas tecnologias.

A obrigatoriedade pelo investimento em P&D se dá pelo Artigo 1º, da Lei Nº 9.991, de julho/2000, que diz:

> As concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica ficam obrigadas a aplicar, anualmente, o montante de, no mínimo, setenta e cinco cen-

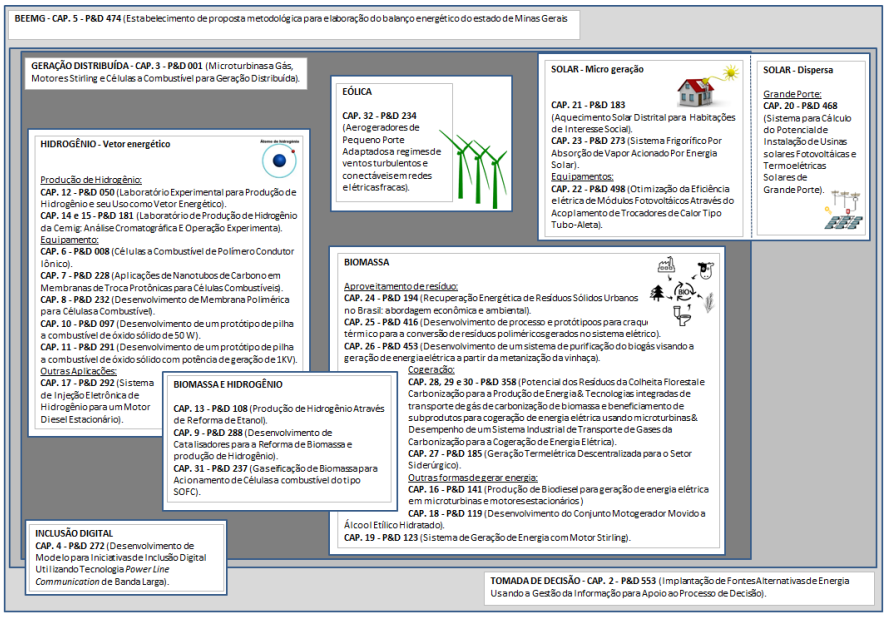
> tésimos por cento de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico e, no mínimo, vinte e cinco centésimos por cento em programas de eficiência energética no uso final (...) (Art. 1º, Lei Nº 9.991/2000).

Antes mesmo desta lei, a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, já possuía um portfólio com diversos projetos. Nos dias atuais, é responsável por inúmeros projetos de P&D, sendo a Gerência de Alternativas Energéticas, responsável por aqueles que abordam assuntos relacionados à energia renovável. De acordo com a própria [13], "o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (...) visa incentivar a busca constante por inovações e fazer frente aos desafios tecnológicos do setor elétrico.".

Além disso, a Cemig é responsável pela elaboração do Balanço Energético de Minas Gerais, e tem papel importante no momento de tomadas de decisão, relacionadas ao Setor Elétrico do próprio Estado.

Diante deste contexto, este Livro foi elaborado como forma de aproximar os cidadãos aos resultados obtidos nestes diversos projetos, com o intuito de expandir o conhecimento e divulgar o conceito das fontes alternativas de energia. A Figura 3 trás a organização geral do mesmo, observando a correlação entre os assuntos abordados nos projetos P&D, aqui presentes em forma de resultados (artigos publicados).

Figura 3 – Organização e correlação dos temas abordados no livro.(A autora, 2016)



Com isso, a seguir, são apresentadas pequenas considerações relacionadas aos próximos capítulos, levando-se em conta o teor de cada artigo, e suas relevâncias e correlações.

A. Cap. 2 - Implantação de Fontes Alternativas de Energia Usando a Gestão da Informação para Apoio ao Processo de Decisão [5].

O universo das energias alternativas é amplo e, com isso, tem sempre uma opção de solução para um problema energético. O que não se havia pensado é no aumento da facilidade e precisão ao tomar a decisão de investir em uma, ou em outra, fonte energética.

O artigo apresentado propõe um novo paradigma, a análise consciente das oportunidades de aproveitamento energético, considerando os aspectos técnicos, financeiros e econômicos, relacionados à área de aplicação. Tais dados, esclarecidos, facilitam a tomada de decisão do gestor, quando da escolha por algum tipo de energia (solar, eólica, biomassa, hídrica, etc.).

A criação de um *software* que facilite tais análises é de grande importância, principalmente considerando-se o constante crescimento do setor elétrico.

B. Cap. 3 - Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída [34].

Dentro deste mesmo cenário, começa-se a expandir uma nova modalidade de geração de energia, a conhecida Geração Distribuída (GD). Tal utilização se mostra atrativa em regiões em que a atual infraestrutura, de transmissão e distribuição de energia, não atende. Ou seja, a GD traz o conceito de geração e consumo de energia em um mesmo local, evitando-se perdas e gerando, na maioria dos casos, economia financeira.

Aliando a Geração Distribuída com fontes alternativas de energia, ou seja, a utilização de sistemas de geração que utilizam combustíveis ou fontes renováveis, a contribuição ambiental torna-se ainda mais satisfatória.

Estudou-se, em projetos de pesquisa e desenvolvimento – P&D, a implementação da geração termelétrica em pequena escala, envolvendo o universo das microturbinas a gás e a líquido orgânico, e ainda, motores Stirling e células a combustível.

C. Cap. 4 - Desenvolvimento de Modelo para Iniciativas de Inclusão Digital Utilizando Tecnologia *Power Line Communication* de Banda Larga [35].

Considerando alguns conceitos como Geração distribuída e ampliação de funcionalidades, temos a utilização da infraestrutura de transmissão e distribuição de energia, para o fornecimento de outros serviços à sociedade.

Em todos os locais, independente se com ou não a geração pontual de energia elétrica, a implementação de recursos que possibilitam a automatização de sistemas

podem trazer melhorias incontáveis, não só ao usuário, como também às concessionárias e órgãos regulamentadores.

A *Power Line Communication* é um exemplo de tecnologia de comunicação de dados, que poderia ser inserida no contexto apresentado, já que opera com rádio frequência e pode utilizar a rede de energia elétrica como meio de transporte. O que deve ser levado em consideração é o custo dos equipamentos capazes de transmitir e captar tais frequências na linha de transmissão, já que este fator pode inviabilizar tal inovação.

D. Cap. 5 - Estabelecimento de proposta metodológica para elaboração do balanço energético do estado de Minas Gerais.

A elaboração do BEEMG – Balanço Energético do Estado de Minas Gerais, é de responsabilidade da Cemig, e tem grande importância no setor energético. Além de mostrar um panorama do mesmo, ainda fornece informações sobre as tendências de consumo de energéticos e a representação de cada setor da economia dentre esses consumidores.

Uma proposta metodológica para a elaboração de tal documento vem de encontro com a melhoria da informação, tornando-a cada vez mais confiável e precisa.

E. Cap. 6 - Células a Combustível de Polímero Condutor Iônico [16].

As alternativas energéticas, renováveis, apresentam-se por várias fontes e tecnologias. Muitas delas, como as células a combustível, devem ser estudadas e desenvolvidas, por apresentarem um grande potencial de aproveitamento. O hidrogênio, extremamente disponível na natureza, embora não em sua forma mais simplificada (H_2), é o energético que trás o futuro da produção de energia. Apesar de poder ser retirado de fontes fósseis (petróleo ou outro combustível desta cadeia), pode também ser retirado de fontes renováveis (água, biomassa, algas, etanol, e outros).

O trabalho elaborado pela CEMIG, nesta área, propõe o estudo de células a combustível que utilizam a entrada direta do etanol e, através do processo interno de reforma, produzem hidrogênio e o utiliza para a geração de energia.

F. Cap. 7 - Aplicações de nanotubos de Carbono em Membranas de troca protônicas para células a combustível [36].

Considerando a composição das células a combustível, por exemplo, de uma do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*), tem-se um eletrólito polimérico e dois eletrodos compostos por uma camada difusora e outra catalítica. A tecnologia envolvida em tal composição está diretamente interligada à eficiência e eficácia do equipamento de geração de energia.

Dentro deste contexto, a Cemig identificou a possibilidade de desenvolver alguns estudos relacionados à nanotecnologia. Os materiais pertencentes a este universo possuem características que são interessantes para a sua aplicação, principalmente em eletrodos.

G. Cap. 8 - Desenvolvimento de Membrana Polimérica para Células a Combustível [37].

Considerando a troca iônica um dos processos mais importantes para o funcionamento de uma Célula a Combustível, o desenvolvimento de membranas também já foi tema de projeto de pesquisa da Cemig, em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais. Apontaram-se as dificuldades da utilização de membranas poliméricas e, os estudos foram direcionados a desenvolver as características desejáveis e propor solução para as indesejáveis.

Como todos os estudos dentro do universo das alternativas energéticas, este também apresenta uma solução energética pontual ou, como já apresentado, relacionada à Geração Distribuída. O grande paradigma a ser vencido está relacionado ao "custo benefício" de tais tecnologias.

H. Cap. 9 - Desenvolvimento de Catalisadores para a Reforma de Biomassa e produção de Hidrogênio [38].

O hidrogênio pode ser obtido pelos processos de reforma de gás natural ou por eletrólise da água. O primeiro método já está bem desenvolvido e, apesar do segundo já ser viável tecnicamente, consome muita energia e, com isso, passa a ser considerado inviável economicamente.

O projeto P&D 288, continuidade do P&D 108, propõe o desenvolvimento de tecnologias capazes de aproveitar a biomassa para a retirada de hidrogênio. Tal proposta é de importância econômica mas, ainda mais importante tecnicamente, considerando sustentável a obtenção de hidrogênio a partir de biomassa.

I. Cap. 10 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W [39].

O projeto P&D 097 desenvolveu um protótipo da célula a combustível do tipo SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*). Conforme já informado, as células a combustível realizam um reação eletroquímica da seguinte maneira; o hidrogênio entra na célula, passando por uma camada/membrana que o separa em íons, em que sua forma catiônica passa direto, e os elétrons tomam outro caminho (eletricidade). Ao final, o hidrogênio em sua forma H+ encontra moléculas de oxigênio, ao reagirem, o resíduo dessa forma de obtenção de energia seria a água.

Considerando a visão Cemig, sob o ponto de vista das alternativas energéticas e, principalmente, o conceito de *smartgrid*, tem-se a célula a combustível como uma das tecnologias mais promissoras para os próximos desafios energéticos.

J. Cap. 11 – Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido de sólido com potência de geração de 1kW [40].

Um dos aspectos levados em consideração, ao analisarmos formas de geração de energia elétrica, é a eficiência do sistema. Logo em seguida, pondera-se o nível de poluição gerado pela fonte escolhida. Considerando que a célula, ou pilha a com-

bustível, utiliza uma conversão direta da energia química de um combustível em energia elétrica, tem-se uma alta eficiência.

Esse projeto seguiu os passos iniciados pelo P&D 097, incrementando o portfólio da Cemig, tanto no quesito inovação, quanto no desenvolvimento de novas tecnologias e processos, além da formação e especialização de mão de obra.

K. Cap. 12 - Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético [41].

A Cemig, assim como nos países desenvolvidos, percebeu a importância do aprimoramento da tecnologia de produção de hidrogênio. Considerando já ter trabalhado em algumas células que utilizam tal combustível, continuar no desenvolvimento da tecnologia, em um laboratório próprio, foi tema do P&D Cemig Aneel 050.

A alternativa do hidrogênio, como vetor energético, leva à solução do armazenamento de energia elétrica. Ao gerar energia acima da necessidade de consumo, pode-se utilizar o excedente para obter o hidrogênio, através da eletrólise da água e, com isso, transformar a energia excedente em energia química.

L. Cap. 13 - Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Operação Experimental [44].

A partir do laboratório experimental de hidrogênio, instalado na UTE Igarapé, em Juatuba/Mg, foi possível a realização de atividades operativas relacionadas ao universo do hidrogênio. Com estas, identificou-se dificuldades e registrou-se resultados que serão importantes para o desenvolvimento fururo de tal tecnologia.

M. Cap. 14 - Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Análise Cromatográfica [43].

Durante o P&D 181, aplicaram-se análises ao gás hidrogênio, considerando que a qualidade do mesmo é imprescindível para a melhor eficiência quando da utilização na célula a combustível.

Considerando a energia gasta para a produção de hidrogênio, o custo de equipamentos relacionados à esta produção, e ainda, a baixa valorização econômica do gás combustível, no mercado; tem-se a inviabilidade econômica da utilização do mesmo para a produção de energia elétrica. Ainda assim, é promissor, e bastam estudos e investimentos para que tal tecnologia se viabilize.

N. Cap. 15 - Produção de Hidrogênio Através de Reforma de etanol [42].

Como citado anteriormente, o armazenamento de energia através da produção de hidrogênio seria uma solução para diminuir as perdas relacionadas ao não consumo. Porém, o gás hidrogênio apresenta grande complexidade quando do seu confinamento, transporte e outros. Com isso, a proposta da utilização da reforma do etanol para a produção do mesmo seria, talvez, uma proposta mais simples para tal

objetivo. Isto se dá pela simplicidade de armazenar tal combustível líquido e, desenvolvendo a tecnologia de reforma e aplicação direta em uma célula a combustível, pela possibilidade de transformá-lo em energia elétrica de acordo com a demanda.

Em contraponto, questões como disponibilidade de área e de água entram em questão. Já que o cultivo de biomassa, para a produção de combustível, deverá ser aumentado, considerando a demanda.

O. Cap. 16 - Produção de biodiesel para geração de energia elétrica em microturbinas e motores estacionários [45].

Coloca-se em pauta a necessidade de diminuir a dependência de um país em relação ao uso do petróleo. Tal situação se dá pela busca de independência no aspecto econômico e, pela contribuição ambiental, com a redução da emissão de poluentes atmosféricos.

Uma das soluções apontadas é a substituição dos combustíveis fósseis, por aqueles conhecidos como biocombustíveis, ou seja, gerados através de produtos renováveis. O biodiesel é apresentado, então, dentro deste contexto, como um líquido capaz de satisfazer as expectativas dos motores à combustão, emitir quantidades menores de gases de efeito estufa, ajudar no desenvolvimento de regiões interioranas, entre outras de suas qualidades.

Fez-se necessário o desenvolvimento de projetos que auxiliassem no entendimento desse universo, no aperfeiçoamento da tecnologia, e no avanço de alternativas energéticas.

P. Cap. 17 - Sistema de Injeção Eletrônica de Hidrogênio para um Motor Diesel Estacionário [50].

Após inúmeros estudos dentro do universo do Hidrogênio, a necessidade de diminuir o consumo de combustíveis fósseis e de dar outras funções ao vetor energético citado, foi proposto um projeto que o utilizasse em motor diesel estacionário. Os processos de estudo e os resultados sobre o mesmo encontram-se descritos no capítulo 17.

Q. Cap. 18 - Desenvolvimento do Conjunto Moto-Gerador Movido a Álcool Etílico Hidratado [53].

O etanol, primeiramente conhecido como combustível sustentável, que já é utilizado em motores de carro. Agora, propõe-se a utilização direta de tal biocombustível em um conjunto Moto-Gerador, para a produção de energia elétrica.

A utilização de tal sistema está interligada com o conceito de produção descentralizada de energia. Ou seja, fornecimento de energia elétrica pontualmente, em locais distantes da infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia.

R. Cap. 19 – Sistema de geração de energia com Motor Stirling [49].

Dentro do conceito de geração distribuída e, ainda no universo de motores, o modelo Stirling identifica-se como um dos mais promissores. Agregam características como, serviço contínuo e estável, custo competitivo, e a simplicidade de utilizar qualquer fonte de calor para o mesmo entrar em funcionamento.

S. Cap. 20 - Sistema para cálculo do potencial de instalação de usinas solares fotovoltaicas e termoelétricas solares de grande porte ([46].

Para a diversificação da matriz elétrica, considera-se o potencial solar um dos maiores a serem desenvolvidos e explorados. Em um projeto de pesquisa, realizado pela Cemig, foi realizado um estudo mais elaborado sobre a disponibilidade de energia solar no estado de Minas Gerais. Tal projeto gerou o Atlas Solarimétrico, que poderá ser utilizado para auxiliar na identificação de locais com potencial para a instalação de empreendimentos.

T. Cap. 21 - Aquecimento Solar Distrital para Habitações de Interesse Social

Uma das maneiras de aproveitar a energia solar é utilizar placas voltadas para o aquecimento de água. Em um projeto da Cemig, estudaram-se parâmetros para determinar melhores comunidades para a instalação de um sistema de aquecimento solar. Foram realizadas pesquisas que possibilitaram o desenvolvimento de um *software* que otimiza os sistemas, considerando a definição de parâmetros.

U. Cap. 22 - Otimização da eficiência elétrica de módulos fotovoltaicos através do acoplamento de trocadores de calor tipo tubo-aleta [22].

Os empreendimentos que aproveitam a energia solar podem utilizar a tecnologia de coletores solares planos para aquecimento térmico da água, ou painéis fotovoltaicos - PV, para a geração de energia elétrica. Na primeira, a temperatura alta é essencial para aquecer a água, enquanto na segunda, PV, a mesma é prejudicial, diminuindo a eficiência da mesma.

Um dos projetos de pesquisa realizado pela Cemig, em parceiria com outras entidades e empresas, prevê um sistema que une as duas tecnologias, aproveitando a complementaridade existente entre ambas. A alta temperatura no painel fotovoltaico é amenizada por transferência de calor à água (exemplo, tubo-aletas), sendo gerada energia elétrica com mais eficiência e, ainda, água quente para uso na instalação. O nome dado a essa junção é *Photovoltaic Thermal Collector* – PVT.

V. Cap. 23 - Sistema frigorífico por absorção de vapor acionado por energia solar [54].

A energia solar não é de uso exclusivo para aquecimento e geração de energia elétrica, ela pode ser utilizada também em tecnologias para produção de frio. Os sistemas de refrigeração são complexos, apresentando diversos equipamentos que tornam o objetivo alcançável.

W. Cap. 24 - Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no Brasil: abordagem econômica e ambiental [25].

As soluções energéticas para complementação da matriz elétrica do Brasil estão sendo abordadas de maneira satisfatória. Contudo, o aproveitamento de recursos que possuem potencial de geração de energia elétrica e, concomitantemente, de poluição do meio ambiente, não é tratado com devida importância.

Os Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, produzidos inevitavelmente em todas as cidades do país, são dispostos em lixões ou aterros sanitários e, todo o seu potencial é descartado e esquecido. O projeto P&D 194, realizado pela CEMIG e UNIFEI, propõe a recuperação energética desses resíduos. Abordam a captação de biogás de aterros sanitários e a utilização do calor gerado pela queima do resíduo em plantas de incineração.

O ponto principal diante de todo esse contexto é trabalhar na diminuição da geração de resíduos, a possibilidade de reuso, reciclagem e recuperação dos mesmos, e, por fim, o aproveitamento energético do resíduo final.

X. Cap. 25 - Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elérico [27].

O aproveitamento energético de resíduos poliméricos pelo sistema de pirólise é uma solução para a destinação do resíduo e, ainda, para a geração distribuída de energia. Esta constatação se comprova considerando que, tal processo diminui o volume de resíduo que deverá ser destinado à disposição final e, que os seus produtos (sólido, líquido e gasoso) possuem considerável potencial energético.

Y. Cap. 26 - Desenvolvimento de um sistema de purificação do biogás visando a geração de energia elétrica a partir da metanização da vinhaça [47].

Sendo o Brasil um país capaz de expandir sua produção de biomassa e, com grande *Know-how* no setor canavieiro, espera-se que o mesmo irá se tornar cada vez maior. A utilização do bagaço e palha de cana de açúcar como combustível em suas usinas já é um passo que indica consciência e, até mesmo, eficiência energética.

Porém, com a produção de etanol, subproduto da cana de açúcar, ocorre a geração de um resíduo líquido, conhecido como vinhaça. Esta, por possuir uma composição favorável, é direcionada ao processo de produção de biogás. Antes deste produto ser utilizado, em queima e produção de energia, é prudente que seja purificado e, com isso, o teor de componentes indesejados reduzido.

Z. Cap. 27 - Geração Termelétrica Descentralizada para o Setor Siderúrgico [31].

Buscando o aproveitamento energético de todos os resíduos com potencial para tal, encontra-se, o setor siderúrgico, em uma situação de grande possibilidade de implantação de medidas de eficiência energética. O projeto apresentado pelo P&D

185 considera esse cenário, e propõe a instalação de usinas termelétricas dentro das indústrias siderúrgicas.

AA. Cap. 28 - Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica usando microturbinas [6].

O setor siderúrgico mineiro, como já falado, é de grande porte, e faz uso, principalmente, do carvão vegetal. Este, por sua vez, tem sido produzido em grande escala, principalmente por processo de pirólise lenta. Tal processo gera, além do próprio CV, alguns subprodutos, como gases residuais, tiço (madeira não carbonizada completamente), e outros, conhecidos como resíduos florestais (gerados na colheita da espécie vegetal a ser beneficiada).

Importa observar que os resíduos apresentados possuem potencial energético e, diante de um contexto de eficiência energética, deveriam ser aproveitados. Para tal, um projeto de P&D da Cemig, em parceria com outras instituições e empresas, desenvolveu um sistema de aproveitamento dos resíduos, considerando o beneficiamento dos mesmos, sua queima, e a produção de energia elétrica a partir de: troca de calor e do conjunto turbina-gerador.

BB. Cap. 29 - Potencial dos Resíduos da colheita florestal da carbonização para a produção de energia [9].

A utilização de resíduos gerados no processo de colheita florestal e, também, de carbonização da madeira, é justificada devido à estudos que comprovam o seu potencial energético. O projeto P&D 358, realizado pela Cemig, em parceria com a ArcelorMittal, realizou estudos e experimentos que realmente qualificasse os resíduos que foram identificados no processo de produção do carvão vegetal.

Diante de análises experimentais, como densidade e composição química dos materiais, foi possível a identificação dos resíduos de maior potencial. Consequentemente, confirmou-se a possibilidade de utilizá-los em um processo de cogeração de energia.

CC. Cap. 30 - Desempenho de um Sistema Industrial de Transporte de Gases de Carbonização para a Cogeração de Energia Elétrica [8].

Considerando o aproveitamento do gás residual, gerado no processo de carbonização, para a produção de energia, alguns pontos devem ser ressaltados. Tal combustível não é totalmente homogêneo, apesar de ser comburente. E, para que o mesmo seja transportado, algumas medidas devem ser tomadas, considerando que, com a perda de temperatura, o gás irá condensar e, principalmente, gerar o alcatrão, ambos os resultados prejudiciais à tubulação.

Além da utilização do gás, dentro do contexto de produção de carvão vegetal, pode-se utilizar o calor gerado em tal processo para a secagem da madeira que ainda entrará na câmara de carbonização, melhorando a eficiência do processo.

DD. Cap. 31 - Gaseificação de Biomassa para Acionamento de Células a combustível do tipo SOFC [48].

Após analisar o potencial energético da biomassa e, ainda, as possibilidades inovadoras de produzir energia através de células a combustível, o P&D Cemig estudou a gaseificação da biomassa e a utilização de seu produto em um tipo de célula específica, a SOFC.

Alguns pontos levantados durante o estudo tornam-se essenciais durante a busca por soluções energéticas. A gaseificação é o melhor processo para obter combustível da biomassa? Qual a qualidade do gás produzido? Será necessário o beneficiamento do mesmo, para a inserção na célula a combustível?

EE. Cap. 32 - Aerogeradores de Pequeno Porte Adaptados a Regimes de Ventos Turbulentos e Conectáveis em Redes Elétricas Fracas [26].

Por fim, a energia provinda do vento aparece dentro do contexto de geração distribuída. Aerogeradores de pequeno porte podem ser a solução energética para locais distantes de linhas de transmissão de energia, ou locais com grande instabilidade energética.

1.6 Conclusão

A inclusão, em maior representatividade, das fontes renováveis, na matriz energética brasileira possivelmente não significaria excluir o uso de combustíveis fósseis, ou outras fontes poluidoras, da mesma. Contudo, contribuiria para a redução das emissões de gases poluentes intensificadores do efeito estufa; para o desenvolvimento de determinadas regiões que ainda não possuem eletricidade; para o desenvolvimento tecnológico do país, considerando que envolveria pesquisas e investimentos nesta área; e ainda, além de outras, para o aumento da segurança de fornecimento de energia.

Conclui-se, também, que pesquisas e investimentos são ações inerentes ao processo de valorização e utilização, em maior escala, das fontes renováveis de energia. E a consolidação e disponibilização dos resultados das mesmas, é de extrema importância para a disseminação e multiplicação do conhecimento.

Capítulo 2

Capítulo 2: Implantação de Fontes Alternativas de Energia Usando a Gestão da Informação para Apoio ao Processo de Decisão[2]

***Resumo* – O Brasil tem o importante desafio de ampliar a produção de eletricidade assegurando a demanda e a segurança energética para suportar o desenvolvimento da sociedade. Em um contexto onde dados e informações sobre fontes energéticas encontram-se disponíveis em larga escala, há uma oportunidade de desenvolver uma ferramenta que potencialize e contribua na tomada de decisão de negócios em energia. Neste sentido o presente artigo apresenta, de forma preliminar, o projeto de P&D Cemig GT 553, que trata do uso de ferramentas da ciência de informação, aliadas a modelos de viabilidade econômico-financeiros, tendo como objetivo subsidiar a tomada de decisão sobre a implantação de empreendimentos de energia renovável. Os resultados apresentados no artigo indicam algumas análises econômicas que se constituem na base teórica e sobre as quais serão adicionados os conceitos e filosofias da Gestão da Informação.**

2.1 Introdução

O crescimento da produção de energia elétrica com uso de fontes alternativas renováveis é uma tendência mundial, principalmente levando-se em consideração as questões climáticas e o esgotamento dos recursos fósseis. Com a diminuição dos custos, aumenta-se a competitividade dessas fontes, elevando assim a sustentabilidade da matriz energética, tanto pelo fato de serem menos agressivas ao meio ambiente quanto aos seus impactos sociais.

Nesse contexto, existe uma oportunidade de aprimoramento na metodologia e nas ferramentas de seleção das fontes energéticas a serem utilizadas em cada aplicação possível. Para tanto, foi elaborado o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) no âmbito do Programa de P&D Aneel da Cemig GT nº 553 – Gestão da informação para fomentar a sustentabilidade da carteira de geração de energia elétrica com fontes renováveis alternativas (Código Aneel: PD-4951-0553/2013) iniciado em Julho/2014 com duração prevista de 24 meses e com custo previsto de aproximadamente R$ 330.000,00. Este projeto tem como parceiro executor a Escola de Ciência da Informação da Universidade Federal de Minas Gerais (ECI/UFMG).

A pesquisa tem como premissa a utilização de recursos da gestão da informação para aperfeiçoar o processo de organização e recuperação da informação que será disponibilizada para o processo decisório, com foco no estudo comparativo de vi-

[2] BARRACHO, F. R. A. C.; BARRACHO, R. M. A.; REZENDE, M. M. S. de; PESSANHA, C.; BONATTI, R. A., SILVA, C. H. F. da. Publicado em Congresso em Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

abilidade de construção de fontes alternativas renováveis de energia no mesmo ponto da rede elétrica. Como objetivos específicos são indicados: a recuperação de informação para o processo analítico e decisório; a definição de subsídios para priorizar os projetos com fontes alternativas renováveis e a incorporação da gestão da sustentabilidade no processo decisório, sendo que para finalizar o projeto é prevista a construção de um protótipo (*software*).

As informações serão coletadas, classificadas e sumarizadas por meio de técnicas clássicas combinadas com tecnologias semânticas baseadas em ontologias e vocabulários controlados. A proposta inovadora combina o uso de ontologias em conjunto com outras técnicas de Extração de Informação, tais como: aprendizagem de máquina; técnicas de análise de palavras e técnicas de análise sintática, dentre outras. O uso de ontologias faz com que o campo da Extração de Informação, que visa recuperar informações, se relacione com a área de Representação de Conhecimento. O resultado será o desenvolvimento de um protótipo de alta tecnologia capaz de fundamentar, de modo consistente e largamente aceito, as decisões estratégicas em relação à escolha de qual tecnologia alternativa a utilizar para a geração de energia elétrica renovável em cada situação.

Considerado que o projeto encontra-se em fase inicial de desenvolvimento, será apresentado neste artigo apenas a parte inicial de levantamento conceitual associado com um estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica. Essa descrição contempla apenas a primeira etapa do projeto e será a base para o protótipo, onde serão agregados os conceitos de gestão da informação, bem como a estrutura de construção dos resultados esperados para o projeto.

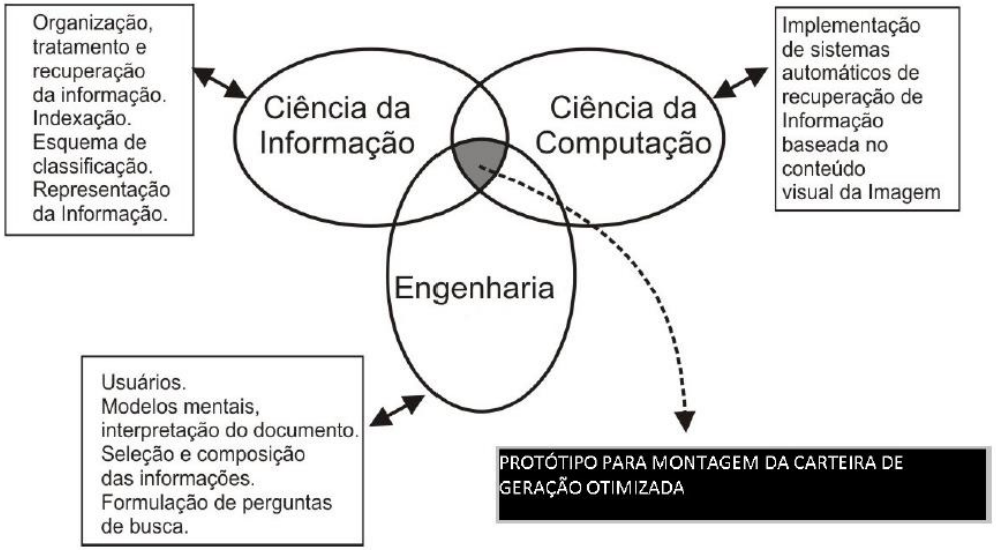
A originalidade do projeto advém da criação de um *software* de inteligência e monitoramento que combine informações de diversas fontes externas e internas à Empresa e que, ao final, indique a melhor solução para um dado problema; ou seja, a melhor fonte alternativa renovável para produção de energia elétrica em determinada região da rede elétrica.

O estudo de viabilidade preliminar apresentado neste artigo analisa possíveis fontes de energia renováveis para uma usina geradora de energia elétrica aplicada a Minas Gerais, tendo como definição uma usina de 50 MW de capacidade nominal, no norte do estado. As alternativas estudadas são: eólica, solar e biomassa. As pequenas centrais hidrelétricas serão comparadas, servindo como referência, mas não utilizadas como alternativa.

2.2 Desenvolvimento da Pesquisa

O caráter interdisciplinar da pesquisa é indicado na Figura 1

Figura 1 – Áreas e conceitos envolvidos no P&D GT553 [1].



A gestão da informação para otimizar o retorno financeiro da carteira de geração considerada nessa pesquisa está baseada em conceitos de estratégias de recuperação da informação para fornecer de forma eficaz e eficiente informações para o processo decisório. A gestão da informação envolve conceitos e técnicas de organização, tratamento, indexação e recuperação da informação. Essa pesquisa busca a organização da informação com uso de ontologias no sentido de representar o conhecimento de um domínio de fontes de energia renováveis.

A. Gestão da Informação

Sistemas da categoria Extração de Informação Baseada em Ontologia (OBIE - *Ontology Based Information Extra-tion*) são caracterizados por aplicar um determinado método guiado por uma ontologia para extrair classes, propriedades e instâncias do texto processado. O que distingue OBIE e IE (*Information Extraction*) é que os primeiros usam ontologias como entradas e como saída do processamento [2].

Ao longo dos últimos anos, diversas técnicas de IE têm sido desenvolvidas. Moens analisou e categorizou um conjunto exaustivo dessas técnicas em [3]. Tais técnicas são utilizadas também por sistemas do tipo OBIE e são "guiadas" por ontologias para extrair informações relacionadas a instâncias e valores de propriedade de ontologias. A seguir tem-se uma revisão da literatura, baseada em [4], dos principais métodos de IE que têm sido empregados pelos sistemas OBIE.

Regras linguísticas são representadas por expressões regulares. Segundo [4], a ideia geral desta técnica é a especificação de expressões regulares que permitem a captura de certos tipos de informação. Ao especificar um conjunto de regras semelhantes, é possível extrair uma quantidade significativa de informações.

A técnica de listas Gazetteer se baseia em autômatos finitos como ocorre para as regras linguísticas acima, mas reconhece palavras ou frases individuais, em vez de padrões. As palavras a serem reconhecidas são fornecidas ao sistema na forma de listas. Esta técnica é utilizada na tarefa de reconhecimento das entidades (individuais) mencionadas no texto. E associadas a uma determinada categoria. Por exemplo, pode ser usado para reconhecer estados do Brasil ou países do mundo.

Diferentes técnicas de classificação, tais como SVM (*Suport Vector Machines*), modelos de entropia máxima e árvores de decisão também têm sido utilizadas. Moens fornece uma revisão detalhada caracterizando-as como técnicas de classificação supervisionada [3]. O autor considera também técnicas de tageamento como *Hidden Markov Models* (HMM) e *Condicional Random Fileds* (CRF). Ao utilizar OBIE classificadores são treinados para identificar os diferentes componentes de uma ontologia, como instâncias e valores de propriedade. Sistemas de IE e OBIE que utilizam páginas HTML ou XML como entrada podem extrair certos tipos de informações usando as marcas (“tags”) desses documentos. Por exemplo, um sistema que reconhece marcas HTML para tabelas pode extrair informações de tabelas em páginas “HTML”. A primeira linha da tabela indica os atributos e as restantes linhas indicam os valores dos atributos de instâncias. Documentos XML

oferecem mais oportunidades para extrair informações dessa maneira porque eles permitem que os usuários definam suas próprias marcas.

Alguns sistemas OBIE constroem árvores semanticamente anotadas para analisar o texto como uma parte do processo. As árvores construídas não são destinadas a representar globalmente o conteúdo semântico do texto [5].

B. Projeto Sustentável

Trata-se de uma abordagem para a criação de produtos e sistemas ambientalmente amigáveis, socialmente justos e economicamente viáveis. Isto implica que o projeto deve: oferecer benefícios ambientais óbvios ou mensuráveis; atender às necessidades de todos os envolvidos na sua produção, uso e descarte ou reutilização; e ser competitivo em termos de mercado. Alguns exemplos de projetos sustentáveis são: veículos com consumo eficiente de combustível, edifícios com aquecimento solar, usinas de combustão limpa, embalagens recicláveis e iluminação de baixa tensão.

As tecnologias que fornecem energia sustentável incluem as fontes renováveis de energia tais como: hídrica, solar, eólica, geotérmica e oceânica. É interessante observar que a eficiência energética também possui um papel fundamental na a construção de sistemas energéticos sustentáveis [6].

C. Viabilidade Técnica e Econômica

A viabilidade técnica deverá atender aos aspectos de disponibilidade da fonte, aspectos ambientais, desempenho e política energética do Estado. Aquelas alternativas que atenderem aos requisitos técnicos serão comparadas em termos de viabilidade econômica. O conjunto destas informações será apresentado no fluxo do processo decisório e de estudos de forma a orientar os desdobramentos para decisão sobre investimentos.

As premissas para a avaliação da viabilidade técnica serão definidas em conjunto com CEMIG e as informações necessárias para estudar tal avaliação serão obtidas através do uso das técnicas de busca da informação.

O *software* de suporte a decisão conterá uma avaliação econômica das alternativas em cada situação contendo as informações obtidas automaticamente pelas ferramentas da gestão da informação.

D. Metodologia

A pesquisa será desenvolvida em seis etapas. As etapas incluem [1]:

- Caracterizar o universo de informações da concessionária de energia bem como do setor elétrico;
- Construir um modelo econômico-financeiro (relatados de forma preliminar se constituindo no foco principal deste artigo);
- Desenvolver um protótipo de *software* de suporte à decisão;

- Elaborar a interoperabilidade para carregar a base de dados no modelo econômico-financeiro,
- Sumarizar e avaliar os resultados validando o protótipo de *software*;
- Documentar e divulgar os resultados do projeto.

E. Expectativa de benefícios

Espera-se que os resultados desse projeto possam contribuir para ampliar a discussão sobre o uso de fontes alternativas, bem como orientar e subsidiar o processo de decisão de implantação, levando-se em conta além das premissas técnica e econômicas que resultem em viabilidade do empreendimento, o uso de gestão da informação, ampliando assim a quantidade disponível de informação e por consequência a capacidade decisória e a gestão de riscos.

2.3 Resultados Preliminares: Modelo Econômico Financeiro

Riberio [7] apresenta o estado atual de desenvolvimento de três das quatro fontes de energia elétrica em estudo na região em questão, através das seguintes colocações:

- "O município (Capitão Enéas), distante 471 quilômetros de Belo Horizonte, vai receber a maior usina de energia solar fotovoltaica da América Latina, num investimento de R$ 150 milhões.";
- "No caso da energia eólica, por exemplo, temos dois sítios geradores, um na Serra de Francisco Sá (município homônimo) e outro na região de Pirapora, às margens do Rio São Francisco.";
- "... o Norte de Minas tem um grande potencial para a produção de energia retirada da biomassa. Uma das alternativas é o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar, que pode ser cultivada em larga escala em áreas do Jaíba, o maior projeto de irrigação em área contínua da América Latina.";

Estas fontes, acrescidas do biogás gerado pelo excremento suíno e do aproveitamento hidrelétrico por meio de PCH na Bacia do Rio Pardo são avaliadas, analisadas e comparadas.

O estudo, ao seu final, remete à necessidade de se incluir parametrização de aspectos não rigorosamente tangíveis para a tomada de decisão (por exemplo, riscos, vocação econômica regional, vocação empresarial, aspectos políticos, etc.). Essa conclusão remete a continuidade e evolução da pesquisa e será tema de trabalhos futuros e desenvolvidos ao longo da pesquisa até o encerramento do projeto.

Inicialmente, avalia-se a racionalidade técnica para aplicação das quatro fontes de energia elétrica elegíveis. Se não houver justificativa técnica para o emprego de qualquer uma delas, a mesma é desclassificada. São também considerados na primeira fase aspectos ambientais e de segurança do suprimento nesta avaliação.

Nota-se que se apenas uma fonte se mostrar viável na fase de análise da viabilidade técnica, não há necessidade de realização das fases seguintes.

Em seguida, as fontes classificadas são avaliadas sob o ponto de vista de viabilidade econômico-financeira.

Aquelas que se mostram viáveis são, então, comparadas sob tal ponto de vista (a partir deste ponto, denominada apenas de atratividade), duas a duas. Aquela que se mostra superior em cada comparação, passa a ser comparada com outra fonte e assim sucessivamente. Cada comparação de duas fontes elimina a perdedora e dá direito à vencedora de ser comparada com outra fonte na fase seguinte, ou seja, a fonte menos atrativa é desclassificada.

Em resumo, a metodologia é descrita de forma geral do seguinte modo: se duas fontes se mostrarem técnica, econômica e financeiramente viáveis, realiza-se uma única comparação de atratividade. Se três fontes se mostrarem viáveis tecnicamente e econômico financeiramente, realizam-se duas comparações de atratividade, duas a duas. Por fim, se todas as quatro fontes em tela forem viáveis sob os aspectos técnico, econômico e financeiro, são realizadas três comparações de viabilidade econômica, duas a duas.

A viabilidade econômica de cada fonte foi examinada através do VPL (Valor Presente Líquido), com uma taxa de atratividade de 8,36% (WACC – *Weighted Average Cost of Capital*). A avaliação da atratividade é efetuada através do LCOE (custo presente da energia gerada, do inglês "*levelised cost of energy*") de cada alternativa, com o reforço de análise de sensibilidade.

Ao final, obtém-se o tipo de geração distribuída mais viável para a implantação de uma geração de 20 MW no Norte de Minas Gerais.

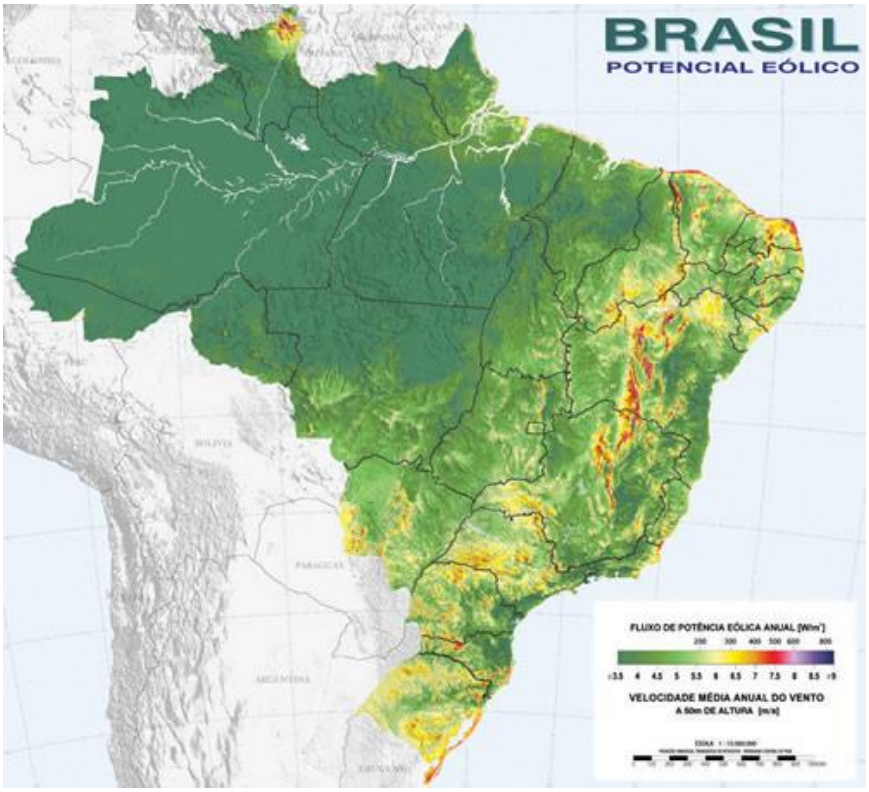
A. Viabilidade Técnica

Inicialmente, verifica-se a racionalidade técnica para aplicação das quatro fontes de energia elétrica estudadas. De maneira muito direta e clara, através de exame da bibliografia apresentada têm-se as seguintes constatações listadas a seguir.

Referindo-se à biomassa, há uma importante região produtora de cana de açúcar na microrregião do Jaíba, que é uma área de irrigação beneficiária de diversos incentivos governamentais, destaca o potencial de produção de cana de açúcar e de álcool nesta microrregião. Ainda referindo-se à biomassa, há significativa atividade de pecuária suína em torno de Montes Claros (principal cidade da região), no entanto, o potencial de geração de energia elétrica por meio da utilização dos resíduos desta atividade não tem sido explorado. Logo, se configura uma boa oportunidade para que se examine a viabilidade de utilização desta fonte de energia elétrica. O artigo de Oliveira [8] mostra um grande interesse para pesquisar a viabilidade de implantação da "energia que vem do esterco suíno".

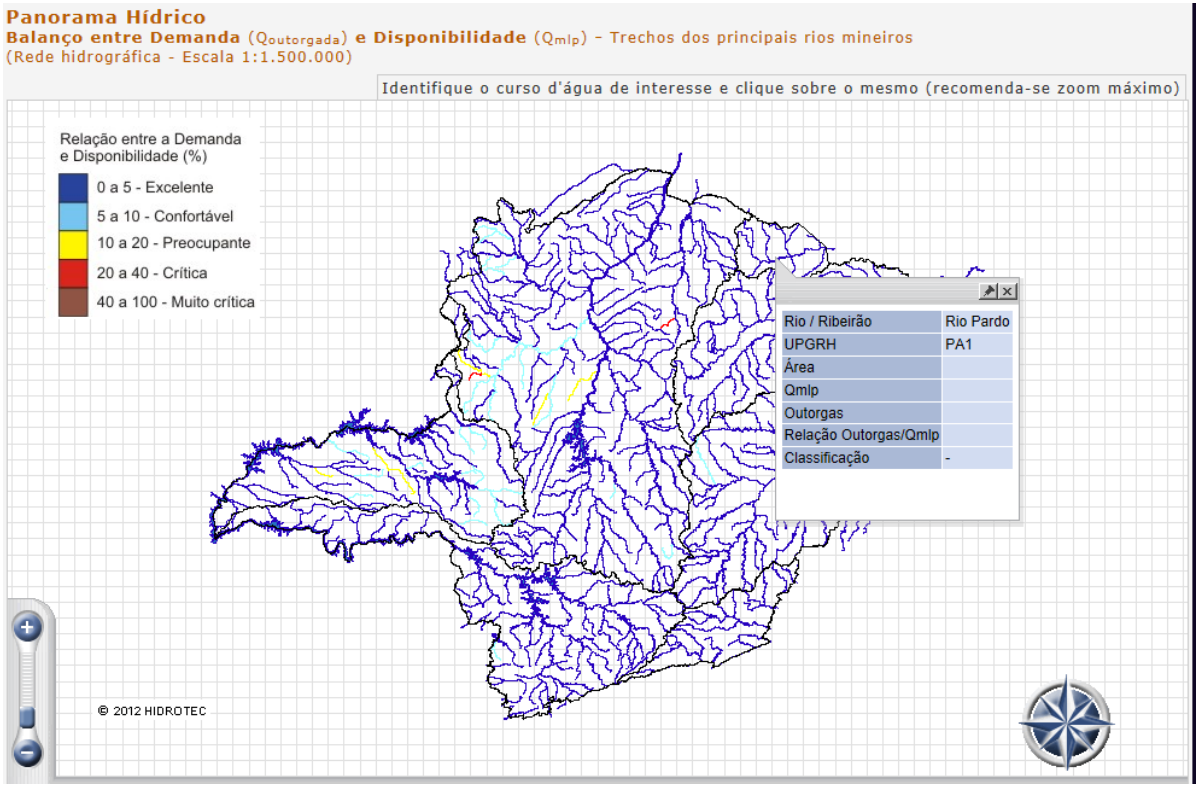
Da mesma forma, como pode ser visto na Figura 2 abaixo que destaca as áreas de fluxo de potência eólica, a região do norte de Minas Gerais apresenta potencial eólico nas faixas superiores do espectro nacional (em m/s a 50 m de altura).

Figura 2 – Potencial Eólico. Destaque para a região de interesse [9].



Embora exista escassez de recurso hídrico na região, ainda há como explorar a hidroeletricidade na bacia do Rio Pardo (Figura 3), com grandes ganhos econômicos e político-sociais possíveis de serem obtidos nesta exploração, pois a microrregião abriga populações carentes.

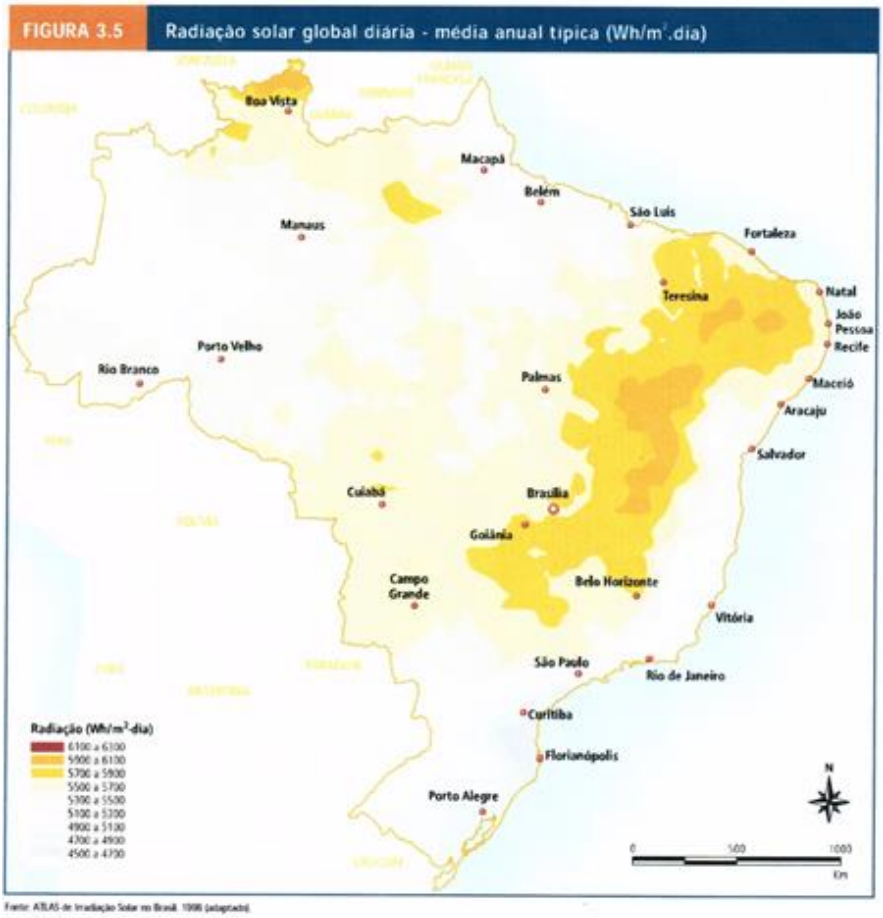
Figura 3 – Panorama Hídrico. Destaque para a região de interesse [10].



Considera-se que haja energia solar suficiente na região. Como pode ser visto na Figura 4 pela área em destaque, a região do norte de Minas Gerais apresenta radiação solar global diária nas faixas superiores do espectro nacional (em Wh/m². dia).

Como se pode depreender, não há qualquer problema de segurança do suprimento associado a qualquer das quatro fontes na região. Com relação aos aspectos ambientais, as quatro opções são "limpas". Portanto, passar-se-á a avaliação, a partir deste ponto, será de quatro fontes tidas como elegíveis, a saber: excremento suíno (biomassa residual), eólica, PCH e solar.

Figura 4 – Nível de radiação solar. Destaque para a região de interesse [11].



B. Viabilidade Econômico-Financeira

As premissas utilizadas para a avaliação econômico-financeira de todas as fontes aqui analisadas são as seguintes (cabe esclarecer que estas premissas são extremamente conservativas para o momento EPE [12] para uma confirmação de quão conservativas são estas estimativas):

- WACC ou Taxa de Desconto = 8,36%;
- Custo do Capital Próprio = 10,00%;
- Financiamento (TJLP + Spread) = 7,95%;
- Financiamento BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social):
    - R$ (sem carência) = 80% do Investimento;
    - SAC (Sistema de Amortização Constante);
    - 20 anos.
    - Impostos:
    - IR = 25%;
    - CSSL = 9%;
    - PIS/COFINS =3,65%;
    - ICMS = Isenção de ICMS.
- Capital de Giro = 5% da Receita Anual;
- Custos Fixos = 1% do Investimento, por ano;
- Despesas = 0,5% do Investimento, por ano;
- TUDg (R$/kW mês) = 4,11367765 (para conexão na Subestação Montes Claros "2" em 138 kV – Eólica, Excremento Suíno e Solar - e na SE Januária "3" em 138 kV – PCH. Há um desconto de 100% nos 10 primeiros anos e de 50% nos anos seguintes, para todas as fontes; logo o valor passa a ser R$ 0 e R$ 2,0568/MWh para os 10 primeiros anos e para os anos remanescentes, respectivamente;
- Valor Residual = 0;
- Vida Útil: 20 anos para as fontes eólica, solar e biomassa e 30 anos para PCH;
- Encargos: TFSEE; Taxa ONS; Taxa CCEE; P&D e Eficiência Energética. Incluídos nas Despesas.

C. Valor Presente Líquido - Parâmetro de Viabilidade Econômico-Financeira.

Utiliza-se o mesmo modelo econômico-financeiro para verificar a viabilidade econômico-financeira de cada alternativa. O modelo é mostrado a seguir na Figura 5.

- Investimento (implantação da Usina) é realizado em 2013;
- No caso da PCH, o horizonte vai até 2043;
- A depreciação é contabilizada apenas como benefício fiscal;
- Fator de Capacidade = 0,42.

Passando a analisar as fontes individualmente, tem-se o seguinte panorama para cada tipo de energia.

Figura 5 – Modelo Econômico - Financeiro a ser utilizado pelo protótipo decorrente do P&D GT553.

Preço (R$ / MWh)		Percentual Financiado	80%	Custos Fixos	Despesas	Capital de Giro
				1%	1%	5%

PIS/COFINS	Capital Próprio	(TJLP + Spread)	WACC	ICMS	CSSL	IR
3,65%	10,00%	7,95%	8,36%	0%	9%	25%

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Investimento																					
Financiamento																					
Receitas																					
PIS/COFINS																					
ICMS																					
Custos Fixos																					
TUSDg (50%)																					
Despesas																					
Capital de Giro (CG)																					
Delta CG																					
Depreciação																					
CSSL																					
IR																					
Financiamento																					
FCO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		TUSDg (R$ / $kW_{mês}$)
VPL		4,11367765
TIR		
TIR-M		
PAYBACK		

Fonte: Elaborado pelos autores.

D. Biomassa

A planta cuja fonte seria o excremento suíno, se escolhida, seria instalada na região rural da cidade de Montes Claros.

Com a utilização de biodigestores cuja potência gerada chega a 20 MVA, consome-se 10.286 m3 de gás por hora ou 103.683 m3 de gás por dia; sendo o fator de capacidade de cerca de 40%. Como a eficiência do processo de obtenção do biogás para geração de energia elétrica é igual a 30%, necessita-se de 345.610 m^3 de biogás por dia. Tendo por base que cada grupo de 1.000 matrizes produz 133 m^3 de dejetos por dia, o que corresponde a 1.330 m^3 de biogás diários, cerca de 260.000 matrizes suínas seriam necessárias [13].

Em função destes parâmetros e de análise de sensibilidade através de simulações para obtenção da melhor especificação para o Biodigestor e sua turbina, escolheu-se o Biodigestor SANSUY com gasômetro de PVC e microturbinas com tecnologia APU (*Airborne Power Unit*). Cada unidade tem potência nominal de 30 kW, logo para fornecer 20 MW, são necessárias 667 unidades. Portanto, são especificados 667 Biodigestores com as seguintes características:

- Potência Nominal = 30 kW;
- O benefício fiscal dos juros é contabilizado, assim como o pagamento do principal e dos juros;
- Indisponibilidade para Manutenção (Preditiva, Preventiva e Corretiva) = 2%;
- Perdas Elétricas Internas = 2%;
- Preço de implantação dos 667 Biodigestores:
    - Turbina = R$ 500 / kW ou R$ 15.000 por turbina. Portanto, para 667 turbinas, tem-se o preço de R$ 10 milhões [14];
    - Biodigestor = R$ 150 / m3. Para 667 unidades, o preço monta a R$ 57 milhões [14];
    - Terra = não se considera custo de aquisição de terra, já que a produção de suínos ocorrerá para abate. A geração de energia seria um produto marginal, cujo impacto nos custos de criação de suínos seria irrelevante, montando a cerca de 1% [14];
- Custo da Conexão ao Barramento 138 kV da SE Montes Claros "2" (incluído o Transformador elevador – preço obtido através de contato telefônico com a área comercial da TOSHIBA do BRASIL) = R$ 1,7 MM.

Os resultados obtidos foram os seguintes e os cálculos são apresentados na Figura 6:

- VPL = R$ 122.000,00;
- TIR = 8,45%;

- *Payback* = 20 anos.

E. Eólica

A planta, se escolhida, seria instalada na região rural da cidade de Montes Claros, mais precisamente a Sudeste da mesma; onde se obtém velocidades médias de vento um pouco melhores [15].

Nesta posição, verificam-se os seguintes parâmetros, de acordo com Teixeira (2010) [15] e cálculos:

- Densidade do ar = 1,1 kg / m3;
- Faixa de Ocorrência de velocidades de vento = 1 a 30 m/s;
- Fator de Escala a 150 metros (Distribuição de Weibull) = 8,6;
- Fator de Forma (Distribuição de Weibull) = 2,7.

Em função destes parâmetros e de análise de sensibilidade através de simulações para obtenção do melhor Fator de Capacidade, escolheu-se o Aerogerador ENERCON E115 de 2,5 MW de potência nominal cada. Portanto, são especificados oito aerogeradores com as seguintes características:

- Diâmetro do Rotor = 115 metros;
- Altura da Torre = 149 metros;
- Velocidade Nominal = 10 m/s;
- Potência Nominal = 2,5 MW;
- Cp = 48,7% a 9 m/s (maior velocidade de ocorrência);
- Fator de Capacidade = 0,4984;
- Indisponibilidade para Manutenção (Preditiva, Preventiva e Corretiva) = 2%;
- Perdas Elétricas Internas = 2%;
- Preço de implantação dos 8 Aerogeradores (obtido através de contato telefônico com a área comercial da Enercon) = R$ 80 milhões;
- Custo da Conexão ao Barramento 138 kV da SE Montes Claros “2” (incluído o transformador elevador – obtido através de contato telefônico com a área comercial da TOSHIBA do BRASIL) = R$ 1,7 MM;
- Os resultados obtidos foram os seguintes (o modelo de cálculo utilizado foi o mesmo do caso anterior):
    - VPL = R$ 138.000,00;
    - TIR = 8,44%;
    - *Payback* = 20 anos.

Figura 6 – Viabilidade Econômica - Financeira da Biomassa (excremento suíno).

Preço (R$ / MWh)																					
127,60																					
PIS/COFINS																					
3,65%																					

centual Financiado (Carência de 3 ar	80%																				
R$ 54.960																					
Capital Própric	Financiamento (TJLP +	WACC																			
10,00%	7,95%	8,36%																			

Custos Fixos																					
1,0%																					
ICMS																					
0%																					

Despesas																					
0,5%																					

Capital de Giro																					
5%																					
CSSL	IR																				
9%	25%																				

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Investimento	-68.700																				
Financiamento	54.960																				
Receitas		9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014	9.014
PIS/COFINS		-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329	-329
ICMS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custos Fixos		-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687	-687
TUSDg (50%)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-494	-494	-494	-494	-494	-494	-494	-494	-494	-494
Despesas		-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344	-344
Capital de Giro	[illegible]	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451	-451
Delta CG	-451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	451
Depreciação		-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435	-3.435
CSSL		-689	-689	-689	-689	-689	-689	-689	-689	-689	-689	-644	-644	-644	-644	-644	-644	-644	-644	-644	-644
IR		-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.914	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790	-1.790
Financiamento		-7.117	-6.899	-6.680	-6.462	-6.243	-6.025	-5.807	-5.588	-5.370	-5.151	-4.933	-4.714	-4.496	-4.277	-4.059	-3.840	-3.622	-3.403	-3.185	-2.966
FCO	-13.740	588	732	876	1.021	1.165	1.309	1.453	1.597	1.741	1.886	1.704	1.848	1.992	2.137	2.281	2.425	2.569	2.713	2.858	3.002
FC	-14.191	588	732	876	1.021	1.165	1.309	1.453	1.597	1.741	1.886	1.704	1.848	1.992	2.137	2.281	2.425	2.569	2.713	2.858	3.452

VPL	R$ 122
TIR	8,45%
TIR-M	8,41%
PAYBACK	20 anos

Investimento
Biodigestor + Turbina + Transformador

TUSDg (R$ / $kW_{mês}$)
4,11367765

Fonte: Elaborado pelos autores.

F. PCH.

A PCH seria instalada no Rio Pardo, na microrregião de Januária. Há outra PCH na microrregião, denominada PCH Pandeiros, de propriedade da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

Nesta posição, verificam-se os seguintes parâmetros, de acordo com informações coletadas em [16]-[17]:

- Queda Líquida D'agua ou Queda de Referência = 30 metros;
- 4 Turbinas Tipo KAPLAN de 5 MW;
- Vazão de Referência = 69 m^3/s;
- Vazão Máxima = 38 m^3/s;
- Vazão Mínima Ecológica = 6,6 m^3/s;
- Mínima Vazão Média Mensal Natural = 9 m^3/s;
- Vazão de Enchente > 100 m^3/s;
- Vazão Censurada = 0 m^3/s;
- P média diária = 11,4 MW.

Em função destes parâmetros e de análise de sensibilidade através de simulações, escolheu-se uma Turbina Kaplan de 5 MW da Voith. Portanto, é especificada uma Planta com 4 Turbinas com as seguintes características:

- Velocidade Nominal = 1.200 rpm, com 6 Polos;
- Potência Nominal = 5 MW;
- Fator de Capacidade = 0,5700;
- Indisponibilidade para Manutenção (Preditiva, Preventiva e Corretiva) = 2%;
- Perdas Elétricas Internas = 2%;
- Preço de implantação da Usina com 4 Turbinas da Voith (obtido através da referência [16]-[17]) – R$ 116,02 milhões;
- Custo da Conexão ao Barramento 138 kV da SE Januária "6" (incluído o Transformador elevador – obtido através de contato telefônico com a área comercial da TOSHIBA do BRASIL) = R$ 1,7 MM.

Os resultados obtidos foram os seguintes (o modelo de cálculo utilizado foi o mesmo dos anteriores):

- VPL = R$ 131.000,00;
- TIR = 8,39%;
- *Payback* = 30 anos.

G. Solar

A planta, se escolhida, seria instalada na periferia da cidade de Montes Claros, onde se tem boa irradiação solar, fácil acesso e proximidade à Subestação Montes Claros "2".

A seguir são indicados os parâmetros para o estudo [11]:

- Radiação: 6.000 Wh/m^2. dia;
- Preço de implantação dos 95.238 Painéis Fotovoltaicos de 210 W cada (obtido da Usina Experimental da CEMIG em Sete Lagoas) = R$ 91,43 milhões.
- Custo da Conexão ao Barramento 138 kV da SE Montes Claros "2" (incluído o Transformador elevador – obtido através de contato telefônico com a área comercial da TOSHIBA do BRASIL) = R$ 1,7 MM.

Em função destes parâmetros, escolheu-se 95.238 painéis fotovoltaicos da Kyocera. Portanto, são especificados estes 95.238 painéis com as seguintes características:

- Número de Painéis = 95.238;
- Potência: 210 W;
- Voltagem de Máxima Potência = 26,6 V;
- Corrente de Máxima Potência = 7,90 V;
- Voltagem de Circuito Aberto = 33,2 V;
- Corrente de Curto-Circuito = 8,58 A
- 20 Inversores Vacon NXV1002A2T;
- Inversor Vacon NXV1002A2T = 1 MW; MPPT: 900 V; 2439 A;
- Configuração = 20 x (30S, 159P);
- Fator de Capacidade = 0,1620;
- Indisponibilidade para Manutenção (Preditiva, Preventiva e Corretiva) = 1%;
- Perdas Elétricas Internas = 0,5%.

Os resultados obtidos foram os seguintes (o modelo de cálculo utilizado foi o mesmo dos anteriores):

- VPL = R$ 122.000,00;
- TIR = 8,43%;
- *Payback* = 20 anos.

H. Comparação de Atratividade através do LCOE (LEVELISED COST OF ENERGY)

Inicialmente, neste item, faz-se necessário calcular o LCOE de cada fonte. O modelo para obtenção deste parâmetro é apresentado para as respectivas fontes e define que:

- os desembolsos totais anuais incorporam todos os custos calculados para definição do VPL do projeto (itens anteriores);
- os MWh produzidos anualmente são descontados ao ano de 2013, assim como os custos e investimentos totais;
- o LCOE é obtido pela divisão da soma dos custos totais descontados mais os investimentos totais descontados pela produção descontada;
- O LCOE da planta de excremento suíno é R$ 128 / MWh gerado. A Figura 7 apresenta as informações detalhadas utilizadas no cálculo do LCOE da fonte de biomassa analisada.

Figura 7 – LCOE excremento suíno.

ANO	INVESTIMENTO (R$ MM)	Produção (GWh)		DESEMBOLSOS TOTAIS (R$ MM)	Fator de Capacidade	Taxa de Desconto (%)
2013	14.191			14.191	0,4200	8,36%
2014		70.461		8.426		
2015		70.461		8.282		
2016		70.461		8.137		
2017		70.461		7.993		
2018		70.461		7.849		
2019		70.461		7.705		
2020		70.461		7.561		
2021		70.461		7.416		
2022		70.461		7.272		
2023		70.461		7.128		
2024		70.461		7.310		
2025		70.461		7.166		
2026		70.461		7.021		
2027		70.461		6.877		
2028		70.461		6.733		
2029		70.461		6.589		
2030		70.461		6.445		
2031		70.461		6.300		
2032		70.461		6.156		
2033		70.461		5.561		
Produção Descontada (MWh)		673.650	Custos Totais Descontados + Investmentos Descontados (R$ MM)	86.054	LCOE	127,74

Fonte: Elaborado pelos autores.

O LCOE da planta eólica é R$127/MWh gerado. A Figura 8 apresenta as informações detalhadas utilizadas no cálculo do LCOE da fonte eólica.

Figura 8 – LCOE Eólica.

ANO	INVESTIMENTO (R$ MM)	Produção (GWh)		DESEMBOLSOS TOTAIS (R$ MM)	Fator de Capacidade	Taxa de Desconto (%)
2013	16.874			16.874	0,4984	8,36%
2014		83.827		10.009		
2015		83.827		9.837		
2016		83.827		9.666		
2017		83.827		9.494		
2018		83.827		9.323		
2019		83.827		9.151		
2020		83.827		8.980		
2021		83.827		8.808		
2022		83.827		8.637		
2023		83.827		8.465		
2024		83.827		8.620		
2025		83.827		8.448		
2026		83.827		8.277		
2027		83.827		8.105		
2028		83.827		7.934		
2029		83.827		7.762		
2030		83.827		7.591		
2031		83.827		7.420		
2032		83.827		7.248		
2033		83.827		6.542		
Produção Descontada (MWh)		801.437	Custos Totais Descontados + Investmentos Descontados (R$ MM)	102.045	LCOE	127,33

Fonte: Elaborado pelos autores.

O LCOE da PCH é R$133/MWh gerado. A Figura 9 apresenta as informações detalhadas utilizadas no cálculo do LCOE da PCH.

Figura 9 – LCOE PCH.

ANO	INVESTIMENTO (R$ MM)	Produção (GWh)		DESEMBOLSOS TOTAIS (R$ MM)	Fator de Capacidade	Taxa de Desconto (%)
2013	24.212			24.212	0,5700	8,36%
2014		95.869		13.675		
2015		95.869		13.428		
2016		95.869		13.181		
2017		95.869		12.934		
2018		95.869		12.687		
2019		95.869		12.440		
2020		95.869		12.193		
2021		95.869		11.946		
2022		95.869		11.698		
2023		95.869		11.451		
2024		95.869		11.530		
2025		95.869		11.283		
2026		95.869		11.036		
2027		95.869		10.789		
2028		95.869		10.542		
2029		95.869		10.295		
2030		95.869		10.048		
2031		95.869		9.801		
2032		95.869		9.554		
2033		95.869		9.306		
2034		95.869		4.351		
2035		95.869		4.351		
2036		95.869		4.351		
2037		95.869		4.351		
2038		95.869		4.351		
2039		95.869		4.351		
2040		95.869		4.351		
2041		95.869		4.351		
2042		95.869		4.351		
2043		95.869		3.266		
Produção Descontada (MWh)		1.043.629	Custos Totais Descontados + Investmentos Descontados (R$ MM)	145.195	LCOE	139,12

Fonte: elaborado pelos autores.

O LCOE da planta solar fotovoltaica é R$ 450/MWh gerado. A Figura 10 apresenta as informações detalhadas utilizadas no cálculo do LCOE da fonte solar fotovoltaica.

Figura 10 – LCOE solar.

ANO	INVESTIMENTO (R$ MM)	Produção (GWh)		DESEMBOLSOS TOTAIS (R$ MM)	Fator de Capacidade	Taxa de Desconto (%)
2013	19.233			19.233	0,1620	8,36%
2014		27.247		11.399		
2015		27.247		11.203		
2016		27.247		11.008		
2017		27.247		10.812		
2018		27.247		10.617		
2019		27.247		10.421		
2020		27.247		10.226		
2021		27.247		12.155		
2022		27.247		9.835		
2023		27.247		9.639		
2024		27.247		9.770		
2025		27.247		9.574		
2026		27.247		9.379		
2027		27.247		9.183		
2028		27.247		8.988		
2029		27.247		8.793		
2030		27.247		8.597		
2031		27.247		8.402		
2032		27.247		8.206		
2033		27.247		7.403		
Produção Descontada (MWh)		260.499	Custos Totais Descontados + Investmentos Descontados (R$ MM)	117.204	LCOE	449,92

Fonte: elaborado pelos autores.

I. Comparação Econômico-Financeira com Análise de Sensibilidade

Eólica x Solar

A primeira dupla de fontes a serem comparadas é composta pela Eólica e pela Solar. Pelos valores apresentados através dos LCOE de ambas as fontes, vê-se que a ordem de grandeza é diferente, logo não há a mínima competividade por parte da energia fotovoltaica.

O que se pode dizer desta fonte é que, no momento, a sua competitividade se coloca em relação à paridade de rede. Ou seja, concorrendo com as tarifas das concessionárias distribuidoras de energia elétrica para as instalações residenciais, comerciais, etc. de baixa tensão, com instalações menores e pulverizadas, o seu mercado deve crescer.

Portanto, a energia eólica elimina a energia solar fotovoltaica do hipotético certame.

Eólica x PCH

A comparação aqui é dificílima, pois os LCOE destas fontes são praticamente os mesmos. Logo, os riscos envolvidos podem fazer com que a situação se volte para um ou outro lado.

Entretanto, tem-se um *payback* mais longo para a PCH e este é o parâmetro escolhido para levar a fonte eólica à final. Além disto, o licenciamento ambiental da PCH representa risco, devido à sua complexidade e isto favorece a opção pela fonte eólica.

Biomassa x Eólica

Novamente, a comparação aqui é dificílima, pois os LCOE destas fontes também são praticamente os mesmos. Logo, os riscos envolvidos podem fazer com que a situação se volte para um ou outro lado.

Portanto, há um empate entre as duas fontes e o investidor deverá estabelecer parâmetros subjetivos para tomar a decisão final. Tais parâmetros poderiam ser, por exemplo: familiaridade com a tecnologia, riscos trabalhistas envolvidos, vocação regional, etc.

J. Próximos Passos

Havendo um modelo econômico financeiro representativo e validado para viabilidade técnica e econômico-financeira, serão então desenvolvidas as técnicas de Gestão de Informação e desenvolvimento do *software* que incorpore o apoio à tomada de decisão de empreendimentos e que se constitui no objeto a ser desenvolvido nas demais etapas do projeto.

K. Discussão Sobre o Estudo Econômico-Financeiro

A região norte do Estado de Minas Gerais apresenta um bom potencial para geração de 20 MW de energia elétrica através de 3 das 4 fontes em questão, a saber: biomassa, eólica e solar fotovoltaica. Em termos de viabilidade técnica e econômica, também 3 dentre as 4 fontes se mostram atrativas; sendo elas: biomassa, eólica e PCH.

A energia fotovoltaica se mostra viável tecnicamente, porém com custos proibitivos; sendo, portanto descartada.

A escolha entre a construção de uma PCH e a geração por meio de uma usina eólica se mostrou de difícil escolha. Apenas o fato de ter um menor *payback* deu uma vantagem mais consistente para a fonte eólica. O complexo licenciamento ambiental de uma PCH reforça a opção pela fonte eólica.

A energia proveniente da biomassa obtida por meio do excremento suíno se mostra tecnicamente viável e com custos praticamente idênticos àqueles da geração eólica.

Devido a este fato, não foi possível apontar uma destas fontes como mais competitiva do que a outra. A decisão foi remetida, então, para critérios subjetivos estabelecidos pelo empreendedor.

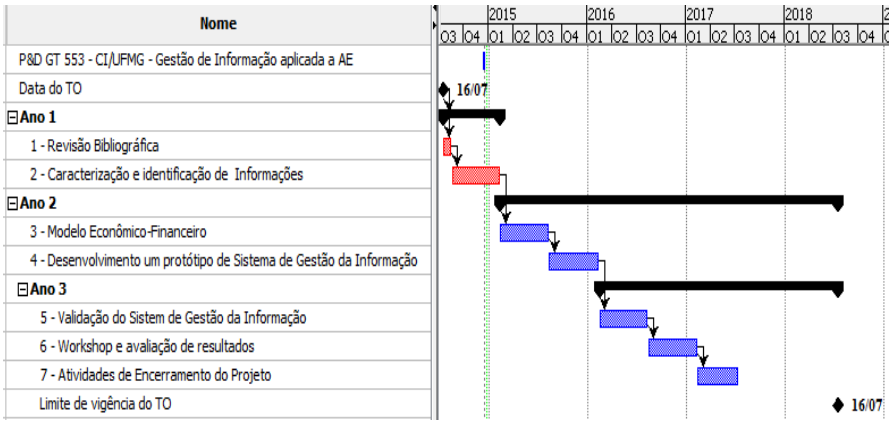
Portanto, através de comparação econômica final por meio da utilização dos LCOE de cada uma das duas fontes (eólica e biomassa), chega-se a uma mesma atratividade tanto para implantação de uma Usina Eólica como para a implantação de uma Usina de Biomassa com excremento suíno, na região em estudo.

2.4 Algumas Questões Sobre o Gerenciamento do Projeto

Este projeto decorre de uma parceria entre a Cemig e Fapemig e a entidade executora (Ciência da Informação/UFMG) devendo atender aos requisitos das instituições bem como do Manual de P&D Aneel e as cláusulas do Edital de Captação de Projeto (Fapemig 015/2012). Desta forma, considerando os requisitos legais e técnicos de execução do projeto, bem como as necessidades de alinhamento estratégico faz-se necessária a adoção de técnicas de gerenciamento de projeto que contribuam para assegurar os resultados. Desta forma adotou-se um plano de projeto que segue aos preceitos do PMI (*Project Management Institute*) [19] constando de:

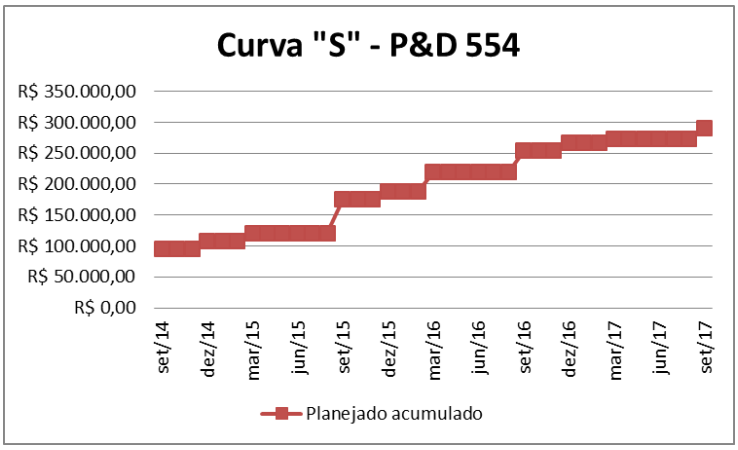
- Plano de Escopo: detalhamento dos requisitos e produtos do projeto;
- Plano de tempo: conforme cronograma indicado na Figura 11;

Figura 11 – Plano de tempo do projeto de P&D GT553.



- Plano de custos: de acordo com a Figura 12;

Figura 12 – Plano de custos do projeto de P&D GT553.



- Plano de qualidade, envolvendo: metas, índices e tolerâncias, sob os aspectos: do objetivo do projeto e da execução física e financeira;
- Plano de recursos humanos: detalhando as responsabilidades na execução do projeto;
- Plano de comunicações planejando reuniões e detalhando os documentos do projeto;
- Os planos de risco e de aquisições: como possuem natureza executiva são de atribuição e ação exclusiva da equipe executiva do projeto;
- Encerrando, consta o plano de integração, direcionando orientações e esforços para a gestão de mudanças e de natureza administrativa.

2.5 Modelo de Apoio a Decisão e Levantamento de Informações Preliminares para a Gestão da Informação

A Figura 13 ilustra o modelo de apoio à decisão do projeto. Na Figura 14 são indicados os principais parâmetros para o processo decisório.

O trabalho inicial do processo de decisão e da gestão da informação do projeto foi o estudo e elaboração de um questionário, que foi respondido por tomadores de decisão e outros profissionais que lidam com o tema de implantação de alternativas energéticas e os resultados foram relatados em [20] e serão relatados de forma resumida a seguir.

Figura 13 – Modelo de apoio à decisão de empreendimento de produção de energia elétrica [20].

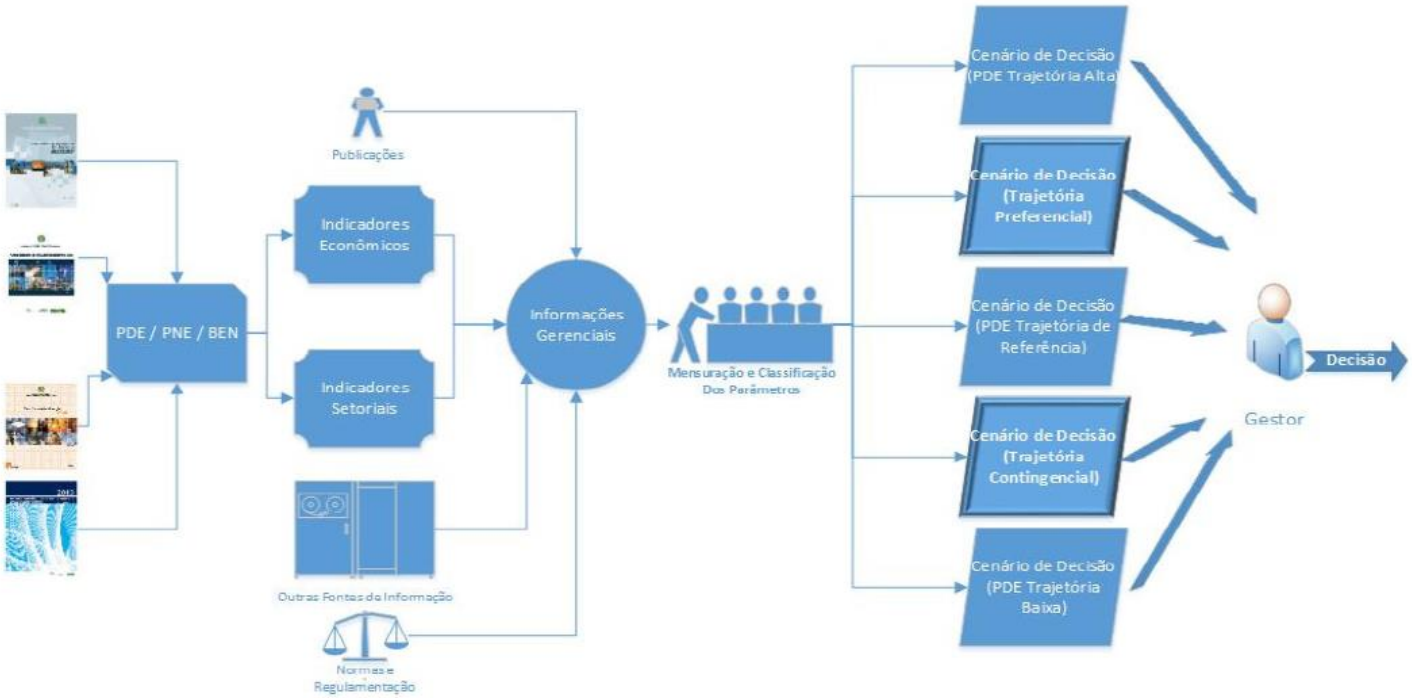


Figura 14 – Parâmetros preliminares do processo decisório [20].

Parâmetros no Processo Decisório
Disponibilidade do Recurso Energético
Vocação da Empresa para produção com a fonte especificada
Rentabilidade (Fontes de Financiamento e Benefícios do Setor)
Tipo de Fonte (Renovável / Tradicional ou Alternativa)
Impacto Ambiental
Domínio da Tecnologia
Alinhamento Regulatório
Visibilidade da Empresa

É importante observar que no momento, os pesquisadores estão realizando uma revisão e aplicação de novos questionários de forma a ampliar e atualizar as informações e aprofundar a pesquisa. As Figuras 15-20 mostram as informações coletadas [20].

Figura 15 – Caracterização dos respondentes [20].

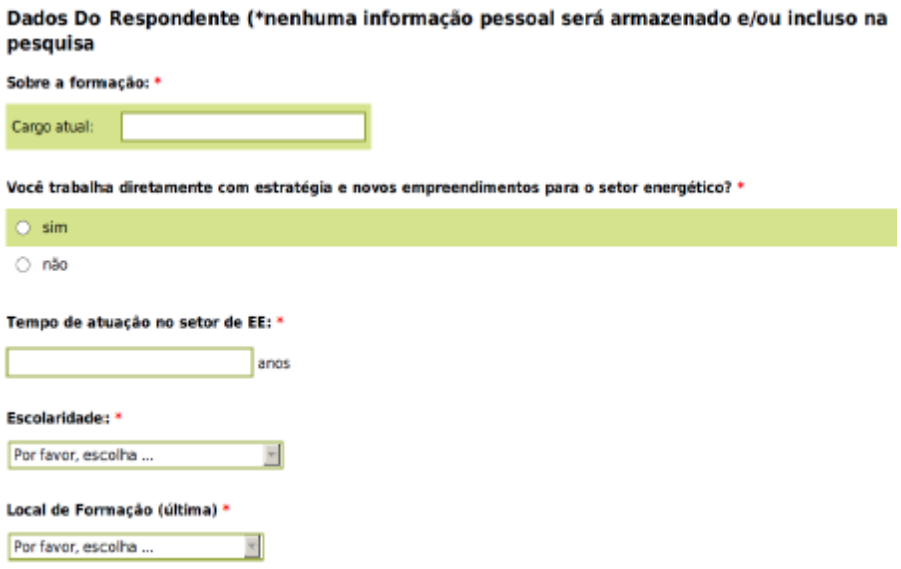


Figura 16 – Documentos e fontes de informação [20].

Documentos, Regulamentação e Fontes de Informações Governamentais *

	Amplamente Utilizado	Utilizado com Frequência	Utilização Eventual	Pouco Utilizado	Nunca Utilizado
Lei 9.991 / 2000 (Dispõe sobre pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética)	○	○	○	○	○
Lei 12.783 / 2013 (Dispõe sobre concessões de energia elétrica, redução dos encargos setoriais e modicidade tarifária):	○	○	○	○	○
Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE):	○	○	○	○	○
Balanço de Energia Útil (BEU):	○	○	○	○	○
Balanço de Energia Nacional (BEN):	○	○	○	○	○
Plano Nacional de Energia (PNE):	○	○	○	○	○
Annual Energy Outlook (EIA):	○	○	○	○	○
Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (Citenel):	○	○	○	○	○
Outra Fonte e sua representatividade:	○	○	○	○	○

Figura 17 – Indicadores econômicos [20].

Categorias de Indicadores e Parâmetros em processos decisórios do setor energético

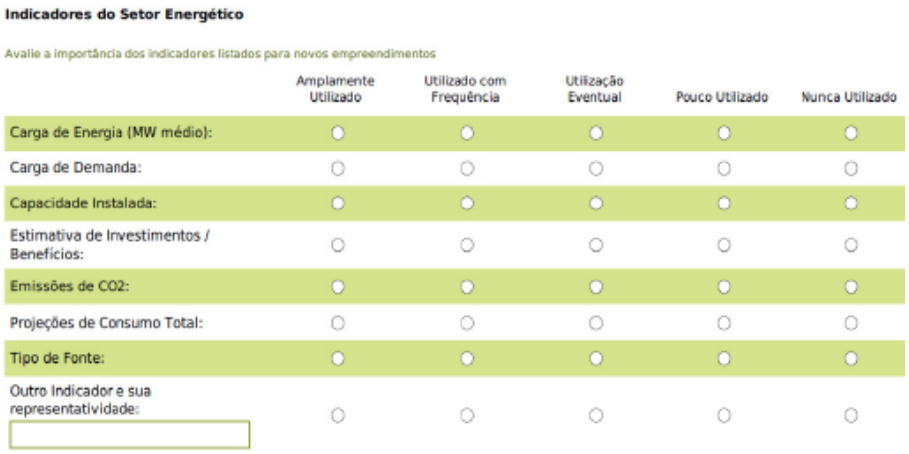
Avaliação das Categorias de Indicadores utilizados no Processo Decisório (Econômicos e do Setor Energético)

Indicadores Econômicos

Avalie a importância dos indicadores listados para novos empreendimentos

	Amplamente Utilizado	Utilizado com Frequência	Utilização Eventual	Pouco Utilizado	Nunca Utilizado
Crescimento Demográfico:	○	○	○	○	○
PIB per Capita:	○	○	○	○	○
Consumo de Energia Elétrica (inclui autoprodução):	○	○	○	○	○
Consumo de EE per Capita:	○	○	○	○	○
Intensidade Elétrica do PIB (KWh/R$):	○	○	○	○	○
Outro Indicador e sua representatividade:	○	○	○	○	○

Figura 18 – Indicadores setoriais [20].



Indicadores do Setor Energético

Avalie a importância dos indicadores listados para novos empreendimentos

	Amplamente Utilizado	Utilizado com Frequência	Utilização Eventual	Pouco Utilizado	Nunca Utilizado
Carga de Energia (MW médio):	○	○	○	○	○
Carga de Demanda:	○	○	○	○	○
Capacidade Instalada:	○	○	○	○	○
Estimativa de Investimentos / Benefícios:	○	○	○	○	○
Emissões de CO2:	○	○	○	○	○
Projeções de Consumo Total:	○	○	○	○	○
Tipo de Fonte:	○	○	○	○	○
Outro Indicador e sua representatividade:	○	○	○	○	○

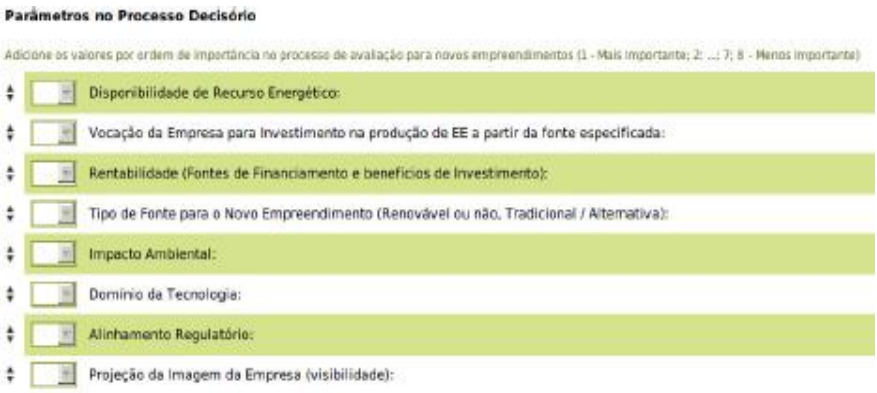
Figura 19 – Parâmetros do processo decisório [20].

Parâmetros no Processo Decisório *

Avalie a importância de cada parâmetro para o processo decisório de novos empreendimentos do Setor Energético

	Imprescindível para novos empreendimentos	Muito Importante	Importância Considerável	Pouco Importante	Não é considerado para novos empreendimentos
Disponibilidade de Recurso Energético:	○	○	○	○	○
Vocação da Empresa para Investimento na produção de EE a partir da fonte especificada:	○	○	○	○	○
Rentabilidade (Fontes de Financiamento e benefícios de Investimento):	○	○	○	○	○
Tipo de Fonte para o Novo Empreendimento (Renovável ou não, Tradicional / Alternativa):	○	○	○	○	○
Impacto Ambiental:	○	○	○	○	○
Domínio da Tecnologia:	○	○	○	○	○
Alinhamento Regulatório:	○	○	○	○	○
Projeção da Imagem da Empresa (visibilidade):	○	○	○	○	○
Outro Parâmetro e sua representatividade:	○	○	○	○	○

Figura 20 – Mensuração [20].



2.6 Considerações Finais

A proposta final deste projeto é a criação de um protótipo de inteligência e monitoramento, na forma de um *software*, que combina informações de diversas fontes externas e interna às organizações e usa de ferramentas de inteligência artificial e ontologias e que, ao final, indique ou oriente a tomada de decisão sobre a melhor fonte alternativa renovável para geração de energia elétrica em um dado ponto da rede elétrica. Essa proposta é original e inovadora. Não há relatos de ferramentas disponíveis ou relatadas na literatura (Banco de P&D da ANEEL, em anais de eventos e nem no banco de dados do INPI), representando uma oportunidade de pesquisa e desenvolvimento que contribua para potencializar a implantação de alternativas energéticas.

Como resultados preliminares foi apresentada a estrutura do projeto, juntamente com a base teórica, constituída pela componente de estudo de viabilidade técnica e econômico-financeira. Baseado no que foi apresentado, serão ainda incorporadas as ferramentas de gestão da informação, resultando no *software* como produto final do projeto.

A expectativa é de que o desenvolvimento deste projeto promova: (i) Capacitação: bolsistas e alunos da UFMG, profissionais da CEMIG envolvidos no projeto em pesquisa aplicada a Ciência da Informação. Já existe pelo menos um bolsista de iniciação científica e um de mestrado realizando os desenvolvimentos do projeto; (ii) espera-se a publicação de artigos em revista e congressos nacionais e internacionais. Apenas com os resultados preliminares já foi publicado um artigo nacional [20] e submetido um artigo para evento internacional; (iii) A UFMG terá apoiada a sua infraestrutura com este projeto criando competência na ciência da informação para lidar com temas e assuntos do setor energético.

Considerando-se os custos do projeto e a expectativa de resultados e benefícios pode-se inferir a razoabilidade, a aplicabilidade e a relevância dos resultados tanto para o setor elétrico quanto para a sociedade.

Capítulo 3

Capítulo 3: Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída[3]

***Resumo*- A geração distribuída - GD consiste na geração de energia próximo onde essa é utilizada. Essa modalidade de geração vem sendo introduzida no mundo apoiada na abertura dos mercados do setor elétrico, de gás e de petróleo, além de ser impulsionada por questões ambientais, amadurecimento e custos das tecnologias aplicadas a esse tipo de geração. Através de equipamentos de GD é possível atender a algumas condições de demanda de forma rápida e com custos econômico, social e ambiental aceitáveis, desde que se tenha no local o combustível adequado. Este artigo trata dos desenvolvimentos em GD, compostos basicamente por: microturbinas a gás, motores Stirling e células a combustível de óxido sólido, realizados dentro do projeto de P&D Cemig/Aneel 001. Os resultados indicam que a aplicação de GD é promissora, tanto operando com combustíveis convencionais como o de fontes renováveis.**

3.1 Introdução

A demanda mundial pela energia vem crescendo continuamente. No Brasil estima-se que a demanda por energia elétrica possa duplicar nos próximos 25 anos, exigindo uma expansão da potência instalada a curto e médio prazo.

A utilização da GD apresenta-se como uma alternativa para as concessionárias atenderem a expansão da demanda em algumas regiões afastadas do centro de carga do sistema elétrico, desde que se consiga contar com o adequado suprimento de combustível no local. As soluções tradicionais para o aumento na capacidade de geração, transmissão e distribuição necessitam na maioria das vezes de elevados investimentos e obras demoradas, que requerem um tempo grande para serem finalizadas.

As novas tecnologias de GD têm permitido a expansão da geração de eletricidade em pequena escala. Além disso, a desregulamentação do setor energético, o incentivo à produção independente de energia elétrica e a crise energética têm aumentado a procura por unidades de geração de rápida instalação e de menor impacto ambiental [1]-[2]. Este cenário apresenta condições favoráveis para avanços tecnológicos e posiciona a geração distribuída (GD) como uma oportunidade de atendimento da expansão do sistema elétrico a custos competitivos com as tecnologias convencionais em aplicações específicas.

De maneira geral a Geração Distribuída (GD) pode ser definida como sendo qualquer unidade de geração de eletricidade a pequena ou média escala localizada per-

3 SILVA, C. H. F.; CARVALHO, A. M. ; COBAS, V. R. M. ; ANDRADE, R. V. ; LORA, E. E. S. ; NASCIMENTO, M. A. R.. Publicado em IV CITENEL Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2007, Araxá.

to dos consumidores, podendo estar conectada à rede de distribuição ou diretamente ao consumidor. O enfoque da GD pode ser situado como um modelo complementar ou alternativo de unidades de geração para novas necessidades. A GD pode contribuir também para a ampliação da potência de reserva ou emergência, para a minimização do pico de carga e para o atendimento de comunidades isoladas. Foram realizadas durante o projeto as avaliações experimentais da geração termelétrica em pequena escala, considerando microturbinas a gás, microturbina a liquido orgânico, motores Stirling e as células a combustível. De forma a fazer uso dessas tecnologias dentro dos requisitos de sustentabilidade, ambientais e socioeconômicos, procurou-se também priorizar a utilização de combustíveis renováveis. Para tanto foram desenvolvidos equipamentos para gaseificação de biomassa, bem como algumas fornalhas para usos específicos com os motores Stirling. Visando melhor aproveitar o conteúdo energético dos combustíveis utilizados nas microturbinas a gás, aproveitamento dos gases de exaustão, foi avaliado o comportamento de sistemas de geração de água quente e água gelada (chiller de absorção), integrados a microturbinas a gás.

Este artigo apresenta os desenvolvimentos realizados em geração distribuída e indica as tendências para a pesquisa futura, tendo como referência, o projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 001 – Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com microturbinas a gás, motores Stirling e células a combustível para geração de eletricidade.

3.2 P&D CEMIG/ANEEL 001

Este foi um projeto com ideias bastante inovadoras e ambiciosas, iniciado no ciclo 1999 e concluído em 2006, dentro do programa de projetos de P&D CEMIG/ANEEL, cujos principais objetivos são destacados a seguir:

- Determinar o desempenho de microturbinas a gás de 30 kWe utilizando diferentes combustíveis;
- Determinar o desempenho de um motor Stirling de 1 kWe utilizando biomassa como combustível;
- Determinar o desempenho de uma SOFC utilizando gás natural como combustível e analisar as possibilidades de uso de outros combustíveis gasosos;
- Definir os parâmetros para operação integrada de sistemas gaseificador-microturbina a gás;
- Avaliar a utilização destes sistemas para atender a consumidores rurais;
- Realizar uma avaliação técnico-econômica detalhada de diferentes sistemas de geração comercial de energia elétrica em pequena escala;
- Desenvolver sistemas de limpeza do gás, a fim de adequar sua qualidade aos requerimentos das microturbinas;

- Estudar as modificações construtivas que se requerem na câmara de combustão para a operação da microturbina com gás de baixo poder calorífico, bem como seu efeito sobre a eficiência da turbina;
- Avaliar o desempenho de chiller de absorção integrado a microturbina a gás;
- Avaliar o desempenho de uma microturbina a líquidos orgânicos de 3 kW;
- Estudar a dependência que existe entre os parâmetros de operação do gaseificador e a qualidade do gás;
- Avaliar a possibilidade de algumas tecnologias operando em ciclo combinado;
- Avaliar um motor Stirling de 9 kW operando com diferentes combustíveis.

Este projeto teve um custo total de aproximadamente R$2.000.000,00 e proporcionou a obtenção de experiências e conhecimentos em geração distribuída, promoveu capacitação de recursos humanos no assunto e a interação de diversas instituições de pesquisa, gerou publicações científicas com participações em diversos fóruns de discussão, além de contribuir significativamente para a criação/reconhecimento do centro de excelência em geração distribuída em Itajubá (NEST/UNIFEI).

Alguns aspectos que de maneira geral afetam qualquer projeto de pesquisa são: a dificuldade de se encontrar e adquirir equipamentos, principalmente se os mesmos forem importados, considerando que alguns destes se encontram apenas em fase inicial de comercialização ou em etapa de demonstração, atrasos por diversas causas e frequentes necessidades de adaptações exigidas para a correta implementação do processo [3].

3.3 Resultados Obtidos

A. Microturbinas a Gás

Além das baixas potências, existem características que distinguem as microturbinas das turbinas industriais e das mini turbinas, como apresentado a seguir [32]:

- Turbinas inicialmente projetadas para aplicações comerciais;
- Elevada e variável velocidade de rotação, entre 33000 e 120000 rotações por minuto;
- O gerador de corrente contínua opera à velocidade da turbina com um inversor acoplado;
- Não usam caixa redutora, a turbina e o gerador estão acoplados no mesmo eixo;
- É utilizado um recuperador para aquecer o ar de entrada para manter a temperatura elevada internamente.

Como principais vantagens das microturbinas pode-se citar:

- Alta durabilidade;
- Projeto simples, permitindo redução de custos e grandes volumes de fabricação;
- Trabalham com baixas pressões;
- São compactas, fáceis de instalar e de reparar;
- Eficiência razoável (30-33%);
- Baixas emissões;
- Permitem cogeração e modularidade.

Como barreiras para sua popularização pode-se citar: alto custo, eficiência com cargas parciais questionáveis, experiência limitada com o uso dessa tecnologia e ruídos de altas frequências.

Foram adquiridas 2 microturbinas Capstone, sendo uma a diesel e outra a gás.

Foi determinado o desempenho de microturbinas a gás usando gás natural e óleo diesel e um estudo de avaliação econômica deste equipamento em operações de base, cogeração e horário de ponta [2], [4]-[9]. Os resultados indicam que as microturbinas respondem de forma rápida à demanda e apresentam um bom desempenho. Microturbinas a gás natural possuem melhor eficiência de combustão e constituem-se em uma boa opção com relação ao aspecto ambiental.

Foi realizada também a modelagem matemática de uma microturbina utilizando técnicas de identificação de sistemas, como por exemplo, os modelos ARX, ARMAX e Box-Jenkins e em seguida a simulação de controle dos parâmetros do equipamento considerando o mesmo operando como carga isolada e em rede interligada [10]. Os modelos foram validados por dados experimentais e apresentaram um desempenho aceitável. Foi avaliado durante o estudo o comportamento da operação em rede interligada.

Testes preliminares da microturbina com biomassa gaseificada mostraram que seria difícil conseguir operá-la unicamente com este combustível. O desempenho das microturbinas com biomassa gaseificada encontra-se atualmente em estudo nos laboratórios do NEST/UNIFEI. Contudo utilizando modelos matemáticos obtidos durante este projeto de P&D e o *software* CFX foram avaliadas as consequências e modificações necessárias da queima de gás de baixo poder calorífico nas microturbinas [11]-[16]. Nestes estudos é possível visualizar as influências dos principais parâmetros de uma câmara operando com combustível gasoso, projetar um combustor com as condições impostas pelo usuário, analisar as emissões do combustor de óxido de nitrogênio, pesquisar a capacidade de modificação de câmara de combustão já existente, avaliar o comportamento da chama de uma câmara de combustão para o caso de microturbina a gás utilizando combustíveis de baixo poder calorífico.

Para funcionamento de microturbina com gás de biomassa exige-se uma alta vazão de combustível na câmara de combustão para obtenção de determinada potência elétrica, sendo assim necessário um aumento nas dimensões da câmara para garantir melhor desempenho do equipamento. A Figura 1 mostra a microturbina a gás estudada.

Foi realizado o acoplamento físico da microturbina com o chiller de absorção. Foi necessária também da instalação de equipamentos auxiliares da microturbina e da instrumentação. O sistema foi modelado matematicamente e posteriormente comissionado. Maiores detalhes serão apresentados em seção específica.

Figura 1 – Microturbina a gás – Laboratório NEST/UNIFEI.

As microturbinas a gás natural da Capstone possuem um sistema mais eficiente de combustão em comparação com as microturbinas a diesel, chamado de queima em regime pré-misturado. Isto implica em duas consequências: Melhor eficiência térmica e nível de emissão de NOX mais baixo. Entretanto as microturbinas a diesel

ainda apresentam emissões inferiores em comparação com as emissões de outras tecnologias de geração de eletricidade com óleo diesel. No cenário brasileiro atual as microturbinas já apresentam viabilidade atendendo cargas de pico e carga de base, principalmente naqueles estados cujas distribuidoras de gás natural têm praticado tarifas de incentivo. Espera-se uma melhor viabilidade no investimento com microturbinas em função de três fatores [2]:

- Produção de microturbinas em grande escala e consequente queda no custo de investimento;
- Crescente aumento da tarifa de energia elétrica das concessionárias no Brasil;
- Tendência de incentivo a cogeração de pequeno porte pelas distribuidoras de gás natural.

B. Gaseificação de Biomassa

O potencial energético de biomassa é enorme, tanto em escala mundial, como no Brasil. Por isso é grande o interesse pela gaseificação de biomassa e pelos sistemas de ciclos combinados gaseificador/turbina a gás. A gaseificação é a conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a elevadas temperaturas. O gás produzido é conhecido como gás pobre e possui contaminantes tais como: partículas sólidas, alcatrão, metais alcalinos, dentre outros, que devem ser removidos, uma vez que são potencialmente prejudiciais às operações dos equipamentos que utilizam deste gás. A gaseificação apesar de ser mais complexa que a combustão direta, apresenta algumas vantagens, como por exemplo: a geração de eletricidade em pequena escala, sem a necessidade de um ciclo vapor, obtenção de eficiências comparáveis as de centrais térmicas a carvão, quando operando em ciclo combinado (BIG-CC) [23]. Geralmente se considera que a faixa de potência de 100 kW a 5 MWe é mais viável para a produção de energia elétrica, dependendo do tipo de gaseificador utilizado.

Foi projetado e construído um gaseificador de biomassa com potência térmica de 245 kW, juntamente com toda a instrumentação/medição necessária para o seu uso [17] a fim de pesquisar e desenvolver o tema dentro deste projeto. O sistema de gaseificação é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Gaseificador de biomassa construído – Laboratório NEST/UNIFEI.

O sistema de gaseificação completo é composto basicamente por: silo, sistema para alimentação da biomassa, queimador, sistema de resfriamento na camisa, ciclone com trocador de calor, sistema 'quench' para resfriamento, lavador de gases tipo Ventury. A utilização dos gases resultantes de um processo de gaseificação, em uma microturbina a gás, por imposição tecnológica deve operar com baixas concentrações de contaminantes. Tal fato se deve aos danos que os mesmos podem causar aos equipamentos, tais como corrosão, erosão e deposição.

O sistema de lavagem dos gases projetado e construído é composto de um ciclone de alta eficiência Stairmand associado a dois lavadores de gás do tipo Ventury com spray pré-formado projetado a partir do modelo de Yung. Ele consegue remover a maior parte dos particulados, garantindo assim que as características dos gases estejam dentro das especificações para uso na turbina a gás [18]. Além destes o sistema ainda possui separador e compressor e soprador.

Foi realizada avaliação experimental do gaseificador considerando leito fluidizado borbulhante para biomassa. Foi também projetado e construído este sistema para medição de teor de alcatrão antes e depois do sistema de lavagem dos gases, a fim de se determinar à eficiência na remoção de alcatrão, garantindo que os limites da substância residual estejam dentro dos limites de tolerância das microturbinas.

O sistema de medição completo composto por: linhas de amostragem, filtro cerâmico, bombas, medidor de gás, sonda, filtração, lavagem do gás, contas de vidro, solvente, banho frio e frascos de amostragem [19].

Resultados dos testes de desempenho deste sistema encontram-se em [20]-[23] e demonstram que o rendimento do equipamento varia entre a faixa de 57 à 75%, dependendo da temperatura de operação, obtendo um gás com composição aproximada da seguinte forma: 8,0-14,0 % CO, 2,5-0,0 % H2, 5,0-4,0 % CH4. Este gás produzido possui um poder calorífico inferior (PCI) aproximadamente dentro da faixa de 3,8-1,4 MJ/m³. O teor de particulados e alcatrão no gás (valor médio): 11,26 e 1,18 g/Nm³ respectivamente, quando operando com casca de arroz. Testes com bagaço de cana e serragem também foram realizados.

De maneira geral, as conclusões deste trabalho podem ser resumidas da seguinte forma: o sistema de alimentação de biomassa para o gaseificador constitui em um importante fator para a estabilidade operacional do gaseificador e em seu desempenho; o sistema de injeção também é fundamental para a operação e não pode ser uma limitação na flexibilidade do gaseificador. O sistema de gaseificação após modificações necessárias durante os testes preliminares [24] encontra-se operacional e mostra capacidade de operar por um tempo relativamente longo [25].

C. Célula Combustível de Óxido Sólido

As células a combustível são similares às baterias, usam um processo termoquímico para obter corrente contínua a baixa tensão [23]. Uma célula combustível é composta por dois eletrodos separados por um eletrólito. O hidrogênio passa através do anodo e o oxigênio através pelo catodo. Quando o hidrogênio é ionizado ao passar pelo anodo, perde seus elétrons e ao ocorrer é transportado pelo eletrólito para o catodo, onde reagirá com o oxigênio formando água. Uma vez que para este processo ocorrer se faz necessária a conexão elétrica entre o catodo e o anodo produz-se energia elétrica. Existe a necessidade de hidrogênio disponível para a operação da célula. Entretanto células a combustível de alta temperatura, como por exemplo, células de óxido sólido, permitem que a reação de reforma aconteça internamente, podendo assim ser alimentado como combustível o gás metano ou etanol, dentre outros possíveis combustíveis.

As células a combustível oferecem várias vantagens sobre a geração de eletricidade, baseada na conversão termomecânica da energia dos combustíveis, estas incluem [23]:

- Elevadas eficiências, que podem chegar à ordem de 30% sobre outras tecnologias que usam combustíveis fósseis;

- Ampla aceitabilidade ambiental;
- Modularidade e rápida instalação;
- Flexibilidade de combustíveis;
- Possibilidade de cogeração.

Dentre as desvantagens pode-se citar: elevados custos iniciais; escasso pessoal especializado nesta tecnologia, dificultando a manutenção; alta sensibilidade a impurezas contidas nos combustíveis e pouca experiência na operação do equipamento.

Foi adquirida uma célula combustível de óxido sólido (SOFC) de 5 kWe. Durante o transporte da fábrica até o local de montagem no NEST em Itajubá houve impacto e inclinação na mesma detectado por sensores. A célula passou por montagem e ajustes por técnico especialista enviado pelo fabricante para verificação de seu estado e comissionamento. A Figura 3 mostra a SOFC montada no laboratório de pesquisa.

A redução da capacidade da célula combustível em relação ao projeto inicial impediu o acoplamento dessa à microturbina devido inexistência de equipamentos com baixa capacidade no mercado.

Figura 3 – Célula de óxido sólido – Laboratório NEST/UNIFEI.

O acoplamento dos equipamentos na potência em que foram adquiridos exigiria a pressurização da célula a combustível. Esse procedimento além de proibido pelo fabricante, é na realidade tecnicamente inviável.

Os resultados de estudos de modelagem e simulação, considerando a integração da célula com microturbinas a gás em ciclo combinado encontram-se em [26]. Foram avaliadas as influências de temperatura e pressão na operação da SOFC, considerando a operação isolada e integrada com a microturbina. Em sistemas híbridos, os estudos mostraram que é possível reduzir a área da célula mantendo elevadas eficiências se comparando com a SOFC operando isolada. O modelo unidimensional desenvolvido permite corrigir os dados obtidos com os modelos simplificados e achar coeficientes de correlação que corrigem dados obtidos na modelagem da SOFC. Foram utilizados dados experimentais obtidos das microturbinas para a simulação do sistema integrado SOFC/microturbina.

D. Motor Stirling

Dentro do atual contexto energético mundial, o uso de motores Stirling vem despertando interesse, principalmente devido à sua característica de motor de combustão externa, conforme mostra a Figura 4, sendo possível à utilização de diversos combustíveis, pois se necessita apenas de uma fonte quente, independente do tipo de combustível, sendo possível inclusive o uso de energia solar, como fonte de calor [27]. A utilização destes equipamentos como GD também vem sendo discutida, se mostrando como mais uma opção para aumentar o acesso à eletricidade para a população que vive em comunidades isoladas. Este motor sempre contém um gás pressurizado no seu interior, que é chamado de gás de trabalho. A potência é gerada não pela queima explosiva do combustível no cilindro, mas pelo aquecimento e resfriamento do gás de trabalho pelo lado externo do cilindro.

O motor Stirling, previamente testado com GLP e gás natural, sofreu modificações para testes com biomassa [27]-[28]. As características da operação de motores Stirling com biomassa foram estudadas e os resultados encontram-se em [29]. Foram necessárias várias modificações nos dutos, câmara de combustão e sistema de controle do motor Solo para adaptá-lo à operação com biomassa. No caso do motor Viebach se fez necessária à modificação do sistema de alimentação da biomassa, a fim de garantir a estanqueidade do mesmo, e foi implementado um pré-aquecedor de ar, cujos resultados encontram-se descritos em relatório específico [30]. A Figura 5 e 6 mostram os motores estudados.

Atualmente, na base da experiência adquirida no P&D CEMIG/ANEEL 001, construiu-se um protótipo fornalha/Motor Stirling para biomassa dentro do P&D 123 – Sistema Gerador de Energia com motor Stirling.

Figura 4 – Motores Stirling Viebach- – Laboratório NEST/UNIFEI.

Figura 5 – Motores Stirling Solo- – Laboratório NEST/UNIFEI.

E. Microturbina a Liquido Orgânico

Uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a biomassa com capacidade de 3 kW foi também testada, dentro do enfoque de avaliação de pequenas unidades de GD. Os combustíveis desta máquina podem ser diferentes resíduos agrícolas, como por exemplo: casca de café, serragem, cavaco de madeira e folha. Os interesses foram: treinamento em operação com tecnologia de termelé-

trica a ciclo Rankine, a liquido orgânico, demonstração da tecnologia, avaliação de desempenho e adequabilidade em GD. Foram estudadas diversas opções para a escolha do melhor local para instalação do gerador. O local considerado adequado foi à carpintaria da Escola de Formação Profissional (EFAP) de propriedade da Cemig em Sete Lagoas/MG (Figura 6). O equipamento encontra-se montado e disponível para visitação por parte do corpo técnico da empresa e demais interessados. Foram realizados os testes de desempenho e os resultados de desempenho encontram-se em [31] e os principais pontos são discutidos abaixo.

Figura 6 – Microturbina a Liquido Orgânico instalada na EFAP, em Sete Lagoas/MG.

O equipamento é constituído de 2 partes separadas e a sua instalação é muito simples, conforme orientação técnica do fabricante. A unidade é capaz de operar automaticamente, desde que seu compartimento de alimentação tenha suficiente quantidade de biomassa combustível. Ela trabalha a baixas temperaturas e pressão. Pode-se alimentar 6 linhas monofásicas, como carga máxima de 500 W por linha, para suprimento de cargas típicas em 60 Hz e 110 Vca. Permite-se modularidade, não há necessidade de respaldo de grandes bancos de baterias e não depende de condições climáticas.

Durante a partida do sistema foi ministrado curso para os técnicos da empresa na operação do equipamento pelo fabricante. A unidade foi alimentada com serragem adquirida das marcenarias locais, sem qualquer tratamento e colocada diretamente no reservatório de biomassa com capacidade de 1,3 m³. A operação da unidade é

muito simples, mas exige a presença de pessoas capacitadas na análise de parâmetros e informações disponíveis na máquina. Após 50 minutos em que é colocada a chama na câmara de combustão, realiza-se a geração.

Em seu funcionamento, o gerador alimentou diversas cargas, tais como: iluminação, geladeira, serra elétrica, furadeira, banco de cargas indutiva, capacitivas e resistivas. A retirada de cargas conforme prioridade pré-programada foi alvo de testes e com comportamento satisfatório. A unidade foi operada por diversos dias seguidos, com vários dias de pausa, partidas e paradas no mesmo dia e em regime contínuo. Alcançou a potência de 2860 W sem perturbações. O sistema trabalhou isolado da rede elétrica local, simulando um atendimento de GD. Durante a avaliação de desempenho houve a necessidade de manutenções com: troca de material refratário, troca de peças do sistema de controle e desparametrização da máquina.

F. Chiller de Absorção

Os sistemas de cogeração integrando microturbinas e chiller de absorção são considerados como uma alternativa razoável para a geração de energia elétrica e resfriamento [33]. Estes sistemas são atrativos devido à economia energética que proporcionam, resultado da recuperação de calor dos gases de saída da microturbina, ao aumento do uso de gás natural no mercado brasileiro e a necessidade de redução de impacto ambiental. Como desvantagens para o uso destes sistemas pode-se citar: a falta de conhecimento e experiência na operação destes sistemas.

Foi realizada a conexão de um chiller de absorção de simples efeito, LiBr-H20 de 10 TR de capacidade calorífica, fabricado por Thermax a uma microturbina Capstone de 30 kW através de um trocador de calor. A montagem foi feita nos laboratórios do NEST/UNIFEI e é mostrada nas Figuras 7-8.

Figura 7 – Chiller da Absorção, Laboratório NEST/UNIFEI.

Figura 8 – Chiller da Absorção acoplando a Microturbina a gás, Laboratório NEST/UNIFEI.

Testes no sistema obtiveram um valor para a eficiência do sistema (COP) da ordem de 0,43. Este valor é compatível com valores encontrados na literatura. É possível considerar esse valor satisfatório, tendo como base os limites estabelecidos para uma central de cogeração, a potência da microturbina e a temperatura de água quente de entrada no chiller.

G. Avaliação Econômica

A Tabela I apresenta o custo de geração e o preço de mercado dos equipamentos. Os custos foram calculados supondo-se uso próprio, fator de capacidade de 91%, vida útil dos equipamentos de 10 anos e custo médio ponderado de capital de 15%. Foi considerado um custo de importação da ordem de 70%. Os valores dos combustíveis foram obtidos em maio/2007.

Tabela 1 – Custo de Geração em Tecnologias de GD.

Tecnologia	**MT GN**	**MS GN**	**MS RE**	**MCI GN**	**MCI OD**	**GB**	**CH**
Preço do equipamento US$/kW	1400 (*)	2200 (*)	2200 (*)	700 (*)	1600 (*)	2400	4700 (*)
Custo da energia R$/MWh	330	360	117	250	243	388	290[#]

Legenda:

- Combustíveis:

GN (gás natural) - OD (óleo Diesel) - RE (resíduos)

- Tecnologias:

MT – Microturbina;

MS – Motor Stirling

MCI – Motor de Combustão Interna

GB – Conjunto Gaseificador/Motor/Gerador

CH – Chiller de Absorção acoplando à MT com sistema de troca térmica

(*) Equipamento importado.

- Aproveitamento de frio

3.4 Direções para Pesquisa

Os equipamentos adquiridos para este projeto foram instalados nos laboratórios do NEST/UNIFEI ou em instalações da CEMIG, por se tratarem de tecnologias em desenvolvimento que não se apresentam suficientemente maduras e confiáveis para serem disponibilizadas para atender consumidores rurais em comunidades isoladas.

Neste projeto foram realizadas avaliações experimentais de sistemas de geração distribuídas de energia elétrica: microturbinas, motores Stirling, microturbina a liquido orgânico e células a combustível, assim como de gaseificadores e fornos de biomassa. Foi avaliado também o comportamento de um chiller de absorção interligado a uma microturbina a gás. Devido às limitações técnicas de operação dos equipamentos, somente foram realizadas simulações teóricas do desempenho desses equipamentos operando em ciclo combinado.

Alguns pontos podem ser ressaltados apenas para indicar algumas possíveis direções de pesquisa, baseados nos estudo executados durante este projeto, como descrito a seguir.

Estudos futuros em gaseificação de biomassa podem caminhar para: a qualidade do gás e testes de diversas biomassas considerando ainda diferentes alturas do leito [25]; desenvolvimento em novas concepções de sistema de alimentação de biomassa; analisar o comportamento do gaseificador com outro agente de gaseificação, como por exemplo, vapor; implementar a instrumentação necessária para o estudo dinâmico do leito fluidizado do gaseificador [20].

Para os motores Stirling, o presente projeto indica que sejam aprofundados conceitos relacionados com a adaptação do motor a um gaseificador de biomassa e a avaliação do motor operando com gás de baixo teor calorífico [27]. Outra alternativa de pesquisa é a avaliação de motores Stirling com concentradores solares.

No caso das microturbinas a gás pode-se citar as seguintes recomendações: estudo de viabilidade de microturbinas operando em horário de pico e como gerador de

emergência em hospitais, hotéis e outros casos do setor terciário, acompanhamento da tendência do crescimento do custo da energia e o seu impacto na geração distribuída, principalmente levando-se em conta o custo da energia na ponta de carga [2]; outras melhorias do sistema podem ser advindas de estudos nas reações químicas envolvidas na câmara de combustão [11]; determinação de campos de temperatura, pressão e velocidade no modelo de câmara de combustão usando como combustível o gás de biomassa para a condição simulada de uma cidade; campo de temperatura e emissão de NOx na exaustão da câmara de combustão [16].

Em se tratando de SOFC, existe a necessidade ampliar os testes de laboratório, uma vez que está tecnologia é a de mais recentes desenvolvimentos.

3.5 Conclusões

A execução deste projeto possibilitou, para o setor elétrico, a avaliação de tecnologias emergentes para geração de energia elétrica, calor e frio, a implantação na UNIFEI de um núcleo de excelência para tratar da geração termelétrica distribuída e formação de mão-de-obra especializada. O desenvolvimento proporcionado pelas pesquisas associadas pode levar a uma oferta de energia produzida de forma descentralizada e com a utilização de combustíveis renováveis e de baixo impacto ambiental. Os benefícios para a empresa (CEMIG) podem se listados a seguir:

- Avaliação das oportunidades tecnológicas introduzidas por tecnologias emergentes, subsidiando a empresa em decisões estratégicas;
- Atendimento a clientes isolados, evitando investimentos no sistema elétrico (LT´s, SE´s, LD´s);
- Otimização da utilização de ativos;
- Aprendizado na condução dos projetos de P&D;
- Atendimento de clientes que demandam energia de qualidade diferenciada;
- Construção de oportunidades de negócios para a empresa.
- Capacitação técnica dos empregados.

Considerando os benefícios para o centro de pesquisa (NEST/UNIFEI), podem ser citados os seguintes:

- Fortalecimento do grupo de pesquisas;
- Laboratórios equipados conforme a necessidade da pesquisa, proporcionando a continuidade de trabalhos;
- Reconhecimento como Centro de Excelência, conforme pode ser atestado pelos informativos da UNIFEI;
- Demanda por aplicação de cursos;

- Participação na execução de relevantes projetos da área;
- Participação em congressos, seminários e conferências. Durante este projeto de P&D houve a participação em 13 seminários, conferências ou congressos, sendo 12 em âmbito internacional;
- Interação com instituições e pesquisadores;
- Aumento da produção científica do Centro em número e relevância. Foram geradas 18 publicações científicas, sendo 13 internacionais e 5 nacionais;
- Foram concluídas 2 teses de doutorado e 6 teses encontram-se em andamento;
- Foram concluídas 6 dissertações de mestrado e 7 dissertações encontram-se em andamento;
- Foram realizados 3 estágios de pós-doutorado.

Todos estes trabalhos/publicações encontram-se depositados na UNIFEI e na Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energética da CEMIG.

Desta forma, pode-se considerar que foram cumpridos os principais objetivos do projeto, devido à:

- Conhecimento de tecnologias operando com diferentes combustíveis. Os testes realizados permitiram definir os indicadores dos equipamentos avaliados (consumo específico de combustível, eficiência, emissões específicas e outros) para diferentes condições de operação;
- Os modelos elaborados permitiram obter resultados referentes a parâmetros de operação das microturbinas e células a combustível para diferentes configurações esquemáticas dos sistemas híbridos. Em outros casos permitiu a avaliação preliminar de sistemas operando com biomassa "in natura" e/ou gaseificada;
- Avaliação de modificações necessárias para a operação dos motores Stirling e microturbinas com biomassa;
- Formação de recursos humanos, interação entre diversas instituições científicas e divulgação dos resultados de testes das tecnologias. Muitos outros projetos de pesquisa usufruirão a estrutura do laboratório que foi montado de acordo com as necessidades deste projeto. Este item mostra-se de grande relevância principalmente levando-se em conta a carência de especialistas nestas áreas temáticas no país.

A utilização em larga escala das tecnologias de geração distribuída vai depender, além da viabilidade econômica que apresenta tendência de melhoras, do suprimento de combustíveis nas várias regiões. Neste contexto a utilização de biomassa é uma alternativa importante para o atendimento, a um menor custo, do crescimento da demanda dos mercados das concessionárias e para o desenvolvimento de áreas carentes, onde a disponibilidade de energia elétrica é baixa, justificando a relevância do estudo realizado.

Capítulo 4

Capítulo 4: Desenvolvimento de Modelo para Iniciativas de Inclusão Digital Utilizando Tecnologia *Power Line Communication* de Banda Larga[4]

***Resumo* – A tecnologia *Power Line Communication* (PLC) oferece inúmeras possibilidades de aplicação. Entre elas, o acesso à internet banda larga, uma vez que, além da possibilidade de criação de novos serviços nas concessionárias de energia, gerando novos negócios, poderia contribuir para a inclusão digital, podendo ser utilizada também com finalidade social. Desta forma, a Cemig D e a Fundação para Inovações Tecnológicas - FITec formaram uma parceria para realizar um projeto que explorasse as iniciativas de inclusão digital, desenvolvendo e implantando um modelo demonstrativo em uma linha de distribuição de energia. Este artigo relata o desenvolvimento e os resultados alcançados neste projeto. Dentre os principais resultados, podemos citar o modelo de implantação e a apresentação de evidências que viabilizam a aplicabilidade desta tecnologia, permitindo que a mesma seja uma alternativa de exploração pelas concessionárias de energia elétrica brasileira.**

4.1 Introdução

A crescente demanda social pela inclusão digital, impulsionada pelo estágio atual de evolução para uma Sociedade da Informação, ocorre em grande parte nas áreas não totalmente cobertas pelas redes de telefonia fixa e móvel. É fundamental para o sucesso de iniciativas de inclusão digital que existam alternativas tecnológicas e de infraestrutura economicamente viáveis que permitam a disseminação do acesso a redes de informação e serviços digitais, inclusive em áreas não atendidas pelas redes tradicionais e de telecomunicações [1].

A alta capilaridade da rede de distribuição de energia elétrica brasileira, que hoje atinge cerca de 96% dos domicílios, aliada às novas tecnologias de transmissão digital banda larga sobre redes de energia elétrica e tecnologias de acesso complementares, habilitam a rede de energia elétrica como a principal alternativa de infraestrutura para a constituição de uma rede de informação e serviços digitais abrangentes e de amplo alcance, capaz de promover a inclusão digital dentro do contexto da realidade brasileira [1].

Nesse sentido, justifica-se a pesquisa e o desenvolvimento de modelos de implantação e produtos de referência baseados em tecnologias de acesso de banda larga (PLC - *Power Line Communication* e tecnologias complementares) que melhor atendam as demandas e necessidades de conexão locais. O desenvolvimento de novos terminais de acesso integrados e multifuncionais, baseado em tecnologias inovadoras e diferenciais, quanto ferramenta de comunicação, potencializam a in-

[4] SILVA, C. H. F.; Silva, E. L. B. ; HOSAMI, M. A. .In: VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

clusão digital, possibilitando a efetiva participação comunitária no setor de telecomunicações [1].

Neste contexto surgiu em 2006 este projeto (Código ANEEL: PD-4590-00302/2007). Em janeiro de 2013, o projeto foi finalizado tecnicamente após 38 meses de execução. A sua realização decorreu da parceria entre Cemig Distribuição SA e Fundação para Inovações Tecnológicas - FITec - e teve como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo para iniciativas de inclusão digital através da implantação de uma rede de comunicação digital multimídia, abrangendo uma localidade desprovida ou precariamente assistida por sistemas de telecomunicações, utilizando a infraestrutura da rede de distribuição de energia elétrica e empregando tecnologias de acesso banda larga PLC.

A metodologia empregada foi a experimentação baseada nos estudos de estado da arte da tecnologia, tendo como alvos os benefícios esperados pelo projeto e também a realização das estratégias das instituições.

O projeto é uma oportunidade de atendimento às necessidades do setor elétrico, possibilitando o estudo e a avaliação de desempenho dos equipamentos PLC, a criação de modelos de implantação de serviços de inclusão digital e a determinação de índices de desenvolvimento das comunidades de acordo com estes modelos. Sendo assim, o produto deste projeto foi essencialmente um projeto piloto e integração de terminais de usuários que demonstram a possibilidade de inclusão digital e social.

4.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. P&D Cemig/Aneel nº 272

Este projeto foi realizado entre dezembro de 2009 e janeiro de 2013. Foi desenvolvido abordando duas linhas com os seguintes objetivos principais e específicos [2]:

a) Objetivos de Desenvolvimento Tecnológico:

- Implantar uma rede de comunicação digital multimídia, abrangendo uma localidade desprovida ou precariamente assistida por sistemas de telecomunicação, utilizando a infraestrutura da rede de distribuição de energia elétrica e empregando tecnologia de acesso banda larga PLC;
- Desenvolver um modelo de referência de implantação de uma rede PLC banda larga para iniciativas de inclusão digital;
- Implantar pontos de acesso à rede em locais públicos.

b) Objetivos de Desenvolvimento Social:

- Atender às necessidades prioritárias de conexão da comunidade com ênfase ao atendimento às demandas das áreas de educação, saúde, segurança e serviços públicos, bem como iniciativas como apoio ao desenvolvimento econômico;

- Treinar e capacitar membros da comunidade na utilização de tecnologias digitais;
- Desenvolver taxonomia de indicadores de impacto relacionados aos projetos de inclusão digital;
- Avaliar os impactos da exposição das populações envolvidas ao acesso às facilidades e informações disponibilizadas pelo projeto;
- Desenvolver uma infraestrutura de comunicação autossustentável, que suporte novas camadas de serviços e aplicações de acordo com as demandas socioeconômicas da população local, bem como o suporte para ações governamentais e da iniciativa privada relacionados à inclusão digital;
- Desenvolver metodologia de avaliação do impacto de ações sociais.

B. Metodologia

Essencialmente o projeto foi conduzido a partir da execução das seguintes atividades [2]:

- Planejamento geral do projeto (item D);
- Elaboração de Especificações, contemplando as especificações da rede e dos equipamentos PLC, além das métricas de desempenho da rede PLC e dos serviços prestados (item E);
- Definição do local de instalação do sistema (item F);
- Implantação e testes da rede PLC em laboratório e em campo (item G);
- Avaliação das demandas da sociedade em tecnologias digitais (item H);
- Treinamento e Avaliação de impacto (item I);
- Elaboração do relatório final do escopo técnico, incluindo um modelo de implantação de uma rede PLC banda larga para iniciativas de inclusão digital (item J);
- Elaboração de relatório final do escopo social, incluindo uma metodologia de avaliação de impacto de ações sociais (item K);
- Realização da transferência de tecnologia (item L).

C. Benefícios

A partir dos resultados alcançados, a concessionária de energia, CEMIG, pode se beneficiar das seguintes formas:

- Alinhamento e aculturamento da concessionária e de todo o pessoal técnico nas mais novas técnicas e tendências de sistemas de comunicação integrados à distribuição de energia elétrica, com aplicações e implicações inclusive para redes inteligentes e geração distribuída;

- Avaliação do uso de tecnologias de acesso de banda larga empregadas como base na infraestrutura da rede de distribuição de energia elétrica, podendo gerar um novo negócio para a empresa;
- Iniciativas sociais trazem melhorias à imagem institucional.

Já para a executora do projeto, FITec, os seguintes benefícios são previstos:

- Reconhecimento como Centro de Excelência e expertise no tema do projeto, gerando demandas por consultoria e por prestação de serviços;
- Novo modelo de terminal público (totem), adequado às necessidades específicas do país, para eventual industrialização e comercialização.

O setor elétrico se beneficia na medida em que aprimora e agrega funcionalidade a infraestrutura existente levando à disponibilidade de novos serviços a sociedade.

D. Planejamento Geral do Projeto

Um diferencial deste projeto sob o ponto de vista de realização físico-financeira foi a adoção das melhores práticas em gerenciamento de projetos, preconizadas pelo PMI (*Project Management Institute*). Desta forma, foi elaborado, no início do projeto, um plano de trabalho geral e detalhado, que foi atualizado a cada entrega técnica ao longo da execução do projeto [3].

E. Elaboração de Especificações

a) Rede e Equipamentos PLC

Power Line Communication é uma tecnologia de comunicação de dados que opera com rádio frequência (RF) utilizando a rede de energia elétrica como meio de transporte. A utilização de redes de energia elétrica como meio de transmissão de dados não é uma ideia nova. Empresas proprietárias desta infraestrutura já utilizam há décadas técnicas conhecidas como *Carrier Frequency Modulation* (CFM), em redes de alta tensão, e Ripple Carrier Signaling (RCS), em redes de baixa e média tensão, para aplicações específicas tais como intercomunicação, telemedição, telecontrole e remanejamento de carga [4].

Mais recentemente, surgiram aplicações capazes de fornecer taxas de dados na ordem de kilobits por segundo, que já não eram voltadas exclusivamente para as concessionárias de energia elétrica. Surgiram, então, aplicações de automação residencial, predial e industrial. Também para as concessionárias surgiram novas aplicações, como a leitura automática de medidores ou AMR (*Automatic Metering Reading*). [4]

A evolução das técnicas de modulação e codificação de sinais, a redução de custos de produção e o aumento da capacidade de integração de semicondutores alcançados nos últimos anos viabilizaram as condições técnicas para se oferecer taxas na ordem de dezenas de megabits através da rede elétrica. Com isso, novas aplicações podem ser exploradas, entre elas o provimento de serviços de voz, vídeo e/ou dados, incluindo o acesso à Internet. A tecnologia PLC banda larga de acesso permi-

te uma taxa de transmissão de até 200 Mbps, e utiliza uma faixa de frequência entre 1,705 MHz e 30 MHz para a transmissão do sinal na rede elétrica em média e/ou baixa tensão. Em geral, a tecnologia PLC banda larga de acesso utiliza a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que é uma modulação propícia para transmissões via rede elétrica. Esta modulação utiliza subportadoras espaçadas igualmente entre si dentro da banda e, com a técnica de modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), mantém uma boa relação sinal ruído SNR (*Signal Noise Ratio*) [4], [13].

O sistema mais utilizado de acesso ao meio é o TDM (*Time Division Multiplexing*), utilizando a banda disponível separada em time slots, que permite disponibilizar os mais exigentes níveis de QoS para redes banda larga.

A tecnologia PLC pode ser classificada com relação à taxa de transmissão e/ou localização na rede elétrica.

Quanto às taxas de dados típicas alcançadas, ela pode ser classificada como:

- Narrowband PLC - voltada às aplicações que demandam baixas taxas de transmissão, geralmente na ordem de kilobits. Tipicamente, é utilizada para aplicações próprias das concessionárias de energia elétrica: sistemas de medição automática (AMR), telecomandos, telemedição e automação da distribuição. Também é utilizada em automação residencial e comercial para sistemas de segurança, controle de iluminação, entre outros;
- Broadband PLC ou Broadband over Power Line (BPL) - voltada às aplicações que demandam altas taxas de transmissão, tipicamente na ordem de megabits. Aplicações comuns são acessos à Internet e formação de rede local, incluindo todos os serviços agregados como: voz sobre IP, vídeo sob demanda, ensino à distância, Home Media Center, sistemas de monitoração, automação e telecontrole, entre outros.

Quanto ao ambiente ao qual a rede elétrica pertence, pode ser classificada como:

- Access PLC - nesta configuração, a plataforma PLC, também conhecida como outdoor PLC, é estruturada sobre as redes de distribuição de baixa e/ou média tensão, podendo chegar até mesmo à rede elétrica residencial ou comercial, sendo capaz de oferecer serviços de acesso à Internet, redes de automação e controle, sistemas AMR, serviços de interesse público (controle de tráfego e vídeo-monitoramento), entre outros;
- Indoor PLC - nesta configuração, a plataforma PLC é estruturada exclusivamente sobre as redes residenciais ou comerciais de baixa tensão, sendo voltada para estruturar redes locais, podendo oferecer serviços de redes de computadores, automação residencial, home media center (voz, dados e vídeo), entre outros.

Os principais equipamentos utilizados em uma rede de acesso PLC banda larga são:

- PLC Access Gateway - são equipamentos geralmente instalados em ambiente externo responsáveis pela transmissão do sinal de dados nas redes de média e baixa tensão;
- Acopladores MT/BT (Média Tensão/Baixa Tensão) - são equipamentos passivos especificamente desenvolvidos para oferecerem o isolamento adequado entre os equipamentos PLC e a rede de energia;
- PLC CPE (*Customer Premise Equipment*) - é o modem PLC que está localizado no ambiente do cliente final, conectado a uma tomada de energia de baixa tensão (127/220 Vac);

As principais funções dos equipamentos de uma rede de acesso PLC são:

- Master - É o elemento que faz a conexão entre a rede de dados e a rede de acesso PLC em média ou baixa tensão. O Master concentra os principais parâmetros de uma rede PLC;
- Repeater - É o elemento responsável por recuperar e reinjetar o sinal de dados em uma rede PLC que sofre atenuações e distorções ao longo do percurso. Obedece aos principais parâmetros definidos pelo Master;
- Slave - É o elemento final de uma rede PLC. Obedece aos principais parâmetros definidos pelo Master.

Diante do estado da arte da tecnologia, e das disposições regulamentares e legais associadas à rádio frequência, foram elaboradas as especificações técnicas para aquisição dos equipamentos, sendo elas:

- Especificação do PLC Access Gateway;
- Especificação do PLC CPE;
- Requisitos de operação da rede PLC;
- Requisitos de gerenciamento e QoS;
- Requisitos de segurança e serviços;
- Requisitos do servidor e dos terminais de usuário.

Tais especificações definiram as aquisições apresentadas na Tabela 1.

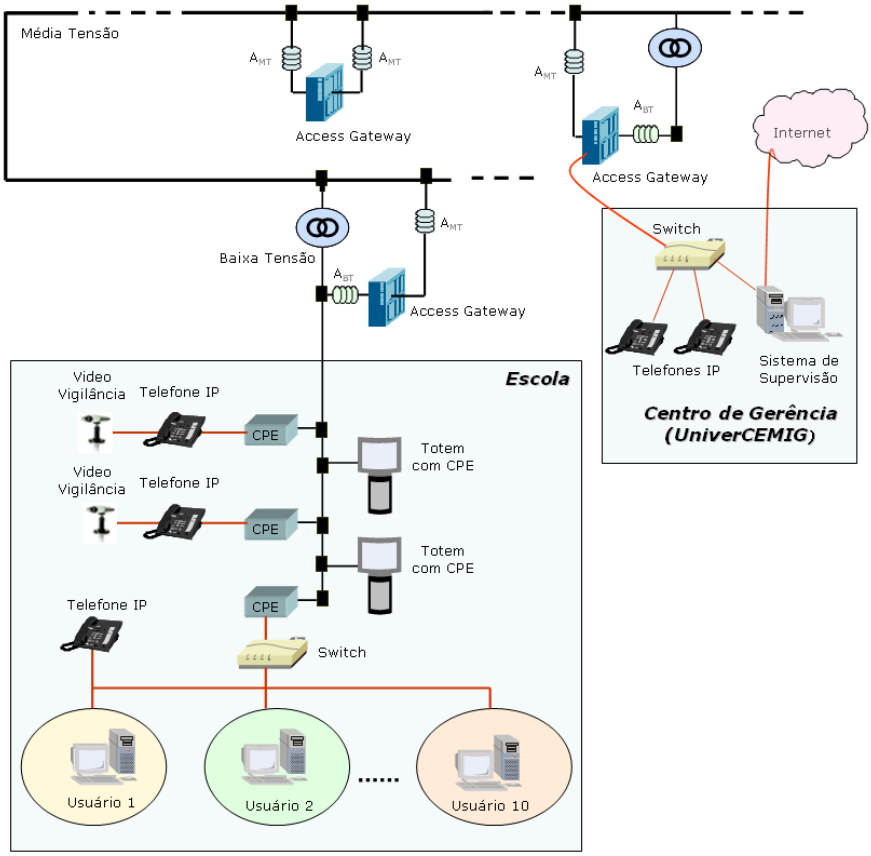
Tabela 1 – Especificação de equipamento para o sistema protótipo.

	Equipamentos	Qt
1	MVG (Medium Voltage Access Gateway)	7
2	HDG (High Density Access Gateway)	5
3	Acoplador Capacitivo MT	12
4	PLC CPE	5
5	Terminal público do tipo totem	2
6	Telefone IP	5
7	Câmera IP	3
8	Servidor com SW de gerência PLC e de rede	1
9	Computador pessoal	10
10	Switch Ethernet	2

O terminal público aparece como uma das soluções para a dificuldade de acesso a informações por parte dos cidadãos que não possuem um computador como ferramenta de trabalho. Ele é uma plataforma de acesso à Internet em ambiente público, cujo conceito permite a estruturação de soluções multicanal e multisserviço baseadas em Internet voltadas ao ambiente público. Um terminal público não é um substituto de uma estação de trabalho. O objetivo é fornecer um ponto de acesso seguro, de fácil uso e de custo razoável a serviços disponíveis primordialmente na Internet. [4]

A Figura 1 apresenta um cenário simplificado da implantação da rede de acesso PLC. No Centro de Gerência está o Sistema de Supervisão, servidor que abriga o *software* de gerência PLC. Este servidor possui duas placas de rede, uma para acesso à Internet e outra ligada a um switch. Este switch comunica-se com 2 telefones IP e com o *Master Access Gateway* através da interface Ethernet. O *Master Access Gateway* comunica-se com os *Repeater Access Gateways* localizados nas redes de baixa e media tensão. Na escola, localizada aproximadamente há 1600 metros da Univer CEMIG, o sinal PLC é transmitido do último *Repeater Access Gateways* para os Slave CPEs, que enviam os dados para os terminais de usuário através da interface Ethernet. Na escola, estão instalados 17 terminais de usuário: 10 computadores, 2 terminais de autoatendimento do tipo totem, 2 câmeras IP e 3 telefones IP.

Figura 1 – Cenário de implantação da rede PLC [5].



b) Métricas de Desempenho da Rede

A verificação objetiva do desempenho da rede nos diversos cenários de aplicação e serviços aos quais se destina constitui uma etapa fundamental do projeto. A verificação do desempenho da rede deve ser feita com base nos requisitos e parâmetros específicos de cada tipo de serviço e confrontados com os possíveis cenários de aplicação, em função dos casos de uso, no que se refere a condições ambientais, interferência eletromagnética, impedância, ruído da rede elétrica, interoperação com equipamentos de telecomunicação baseados em outras tecnologias, dentre outros [6], [12].

Analisadores de espectro, analisadores de rede e *softwares* de gerência são algumas ferramentas que podem ser utilizadas para a medição desses parâmetros. [6]

Dessa forma, é necessário que haja uma padronização de medidas dos parâmetros de um sistema PLC e seus resultados devem ser documentados através de relatórios, sendo estes elaborados seguindo um modelo padrão [6], [12].

Abaixo são descritas algumas das principais métricas de desempenho da rede PLC [6]:

- Supressão de frequências: A supressão de frequências na Densidade Espectral de Potência (PSD - *Power Spectral Density*) é um requisito de grande importância para o sistema. Alguns parâmetros devem ser considerados para indicar a qualidade da supressão de frequências: largura efetiva, largura total e profundidade. Geralmente são feitas medições da PSD de um modem PLC durante a transmissão de dados, permitindo a avaliação das supressões de frequências ativas e parâmetros relevantes;

- Monitoramento do canal PLC: Um fator que pode afetar o desempenho da transmissão de um equipamento PLC é o fato de que as características de um canal PLC variam com o tempo, fazendo com que a resposta do canal não seja constante. Para resolver esse problema, o equipamento PLC precisa conter um mecanismo que adapte seus parâmetros às características atuais do enlace sobre o qual ele trabalha, otimizando a transmissão de informação entre dois pontos deste enlace. Para conseguir implementar este mecanismo, o equipamento PLC precisa armazenar a maior quantidade de características possível para poder adaptar seus algoritmos. Geralmente, é analisada a evolução dos canais PLC através do tempo, coletando os dados de variação de suas características;

- Caracterização dos elementos PLC: Um sistema PLC, constituído por redes de média e baixa tensão, é composto por uma série de diferentes elementos: filtros, acopladores, linhas de média tensão, linhas de baixa tensão, fusíveis, etc. Cada um destes elementos introduz sua própria atenuação e tem sua própria resposta em frequência. Dessa forma, analisa-se a contribuição de cada elemento na atenuação total da rede PLC, considerando, distintamente, os cenários baseados em rede de média tensão e em rede de baixa tensão;

- Desempenho da camada física: Dois importantes parâmetros relacionados à camada física de um sistema PLC são: Controle Automático de Ganho (AGC - *Automatic Gain Control*) e velocidade física (*downstream / upstream*). Geralmente, utiliza-se o protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para realizar um monitoramento remoto de longa duração desses parâmetros, fornecendo informações sobre o desempenho e estabilidade do sistema PLC;

- Desempenho da camada de aplicação: Um parâmetro de grande importância a ser medido e analisado é a escalabilidade do sistema PLC. Para isso, as seguintes medições são realizadas, considerando o funcionamento do sistema PLC em condições rígidas controladas: *throughput* máximo de tráfego TCP ponto a ponto, *throughput* máximo de tráfego TCP ponto-multiponto, latência, limita-

ção de largura de banda para *upstream*, QoS, perda de pacotes e *jitter* de fluxos simultâneos de UDP constante, largura de banda para acesso à Internet;

- Segurança: O objetivo é verificar a implementação de mecanismos que assegurem a privacidade de dados entre CPEs (OVLAN - *Optical* VLAN). Por exemplo: o tráfego gerado por um CPE específico não pode ser "visto" por outro CPE se o mecanismo OVLAN estiver ativo. Deverá ser possível ativar ou desativar esse mecanismo quando necessário;
- Conectividade do cliente LAN: O objetivo é verificar a possibilidade de ter equipamentos CPEs conectados a uma rede LAN e, ao mesmo tempo, mantê-los isolados do resto dos CPEs na célula. A ideia é que um grupo da escola com mais de um CPE possa ter conectividade entre os seus equipamentos;
- Criptografia: O objetivo é verificar a possibilidade de ativação de criptografia na rede PLC. A sobrecarga, que implica na ativação de criptografia, é medida através do *throughput*, para que a degradação no desempenho do sistema seja verificada;
- Evolução da rede: O objetivo é determinar se há interrupções ou rompimento de serviços em execução na rede quando há expansão da mesma, considerando a inserção de novos componentes. Outro objetivo é mostrar também o reflexo da expansão da rede no *throughput* e no balanceamento de carga. São medidos os níveis de degradação dos enlaces quando os novos componentes são inseridos;
- Efeitos de um enlace ruim: O objetivo é medir a degradação introduzida na rede PLC quando é adicionado a ela um novo equipamento (CPE ou repetidor) contendo um enlace ruim (baixa taxa de transmissão na camada física), permitindo a definição de limites admitidos para enlaces com baixa taxa de transmissão e o seu impacto na rede PLC;
- Coexistência entre repetidores: O objetivo é efetuar uma correlação entre o nível de interferência entre repetidores e a degradação dos dados de desempenho (latência, PLR - *packet loss rate*, *throughput*);
- Limites de estresse: O objetivo é medir o comportamento do sistema PLC em um ambiente de estresse, considerando vários CPEs conectados ao mesmo repetidor. Verifica-se o número máximo de CPEs que um repetidor pode suportar sem que haja queda de desempenho (latência, *throughput*, PLR, etc).;
- Coexistência com elementos "não PLC": O objetivo é verificar a queda de desempenho do sistema PLC quando equipamentos eletroeletrônicos de alta e baixa potência compartilham a mesma rede elétrica dos equipamentos PLC.

c) Métricas de Desempenho de Serviços

A convergência de voz, vídeo, dados e aplicações nas redes de comunicação e a prestação destes serviços aos usuários, onde quer que eles estejam, pode represen-

tar uma grande vantagem para as organizações, órgãos governamentais e, especialmente, em iniciativas de inclusão digital.[6]

A comunicação de dados através da rede PLC apresenta-se hoje efetivamente como uma alternativa a ser considerada para a camada física das redes de comunicação, com desempenho semelhante a várias outras tecnologias, permitindo igualmente a implementação de aplicações envolvendo a transmissão de dados, voz e vídeo.

Abaixo são listadas métricas de desempenho de alguns dos principais serviços oferecidos através da rede PLC [6],[12]:

- Serviços de Intranet: A rede local PLC projetada possibilitará a comunicação entre seus usuários, formando uma rede local ou intranet, na qual diversas aplicações podem ser executadas. Em se tratando de uma rede infraestruturada, os seguintes parâmetros clássicos e desempenho de rede são avaliados de acordo com as demandas de cada aplicação: *throughput*, BER, atenuação, atraso;
- Acesso à Internet: O desempenho da rede está relacionado à taxa de transferência dos equipamentos PLC e da qualidade do sinal que chega em cada equipamento PLC CPE dos respectivos usuários. Análises de desempenho, quantitativo e qualitativo, do acesso compartilhado à internet são realizadas a partir do centro de gerência, a fim de se averiguar a qualidade da prestação desse serviço ao usuário, principalmente no que tange à taxa efetiva de dados e disponibilidade do serviço;
- Televigilância: O objetivo é assegurar o correto funcionamento do sistema de televigilância instalado na rede PLC, considerando-se os mesmos parâmetros descritos para os serviços de intranet;
- VoIP: Os serviços de VoIP são muito sensíveis a muitos parâmetros de transmissão inerentes às redes PLC. Estes parâmetros podem afetar drasticamente a qualidade de voz. Por isso, alguns limites pré-estabelecidos devem ser respeitados para minimizar a degradação da qualidade nos serviços de voz. Entre estes parâmetros, se destacam: latência, taxa de perda de pacotes, jitter, mecanismos de priorização, tamanho de buffer, codecs, algoritmos de *polling*, número de domínios de divisão por tempo.

F. Definição do local de instalação

O passo inicial para a implementação deste projeto foi a definição da cidade de Sete Lagoas - MG, pela CEMIG, como site de testes do projeto. Tal definição foi dada em função da proximidade com recursos humanos e materiais da empresa e também a facilidade de visitação e demonstração dos resultados do projeto piloto.

Buscou-se endereços de escolas estaduais e municipais próximas à UniverCEMIG que pudessem estar bem amparadas em termos da qualidade da rede elétrica e em termos de segurança. Este último ponto reflete uma preocupação com vandalismo em escolas públicas em geral. Ou seja, computadores e totens devem ser implan-

tados onde é possível se ter um padrão de segurança adequado. Foram levantados quatro locais, conforme mostrado na Figura 2.

Decorrentes dos estudos de viabilidade técnica, duas escolas foram apontadas como pontos de interesse para o projeto: Escola Municipal Jovelino Lanza e Escola Municipal Clarindo Cassimiro. Esta última mostrou-se a mais apropriada para o projeto, uma vez que:

- A escola dispõe de espaço para a implantação de equipamentos, seja na sala de informática ou na biblioteca. Já as demais escolas não possuem espaços para a implantação da rede, necessitando de verbas para a construção ou ampliação de salas;
- Os alunos da escola não fazem uso de computadores e internet, o que não acontece nas demais escolas visitadas;
- A região mostrou-se segura, se comparada a outras regiões visitadas.

Do ponto de vista financeiro, a Escola Municipal Jovelino Lanza, por estar mais próxima à UniverCEMIG, seria a localidade mais apropriada; porém, a falta de uma sala para a implantação dos equipamentos, a utilização da internet pelos alunos e o baixo nível de segurança da região colocaram esta escola como uma alternativa, caso fosse tecnicamente e financeiramente inviável a implantação da rede PLC na Escola Municipal Clarindo Cassimiro [6].

A Escola Municipal Clarindo Cassimiro apresentou-se como local tecnicamente viável devido aos seguintes fatores:

- Distância aceitável pela rede elétrica de média e baixa tensão até a UniverCEMIG, local que abriga o centro de gerência da rede e o backbone. A Figura 3 ilustra o trecho percorrido pela rede de média e baixa tensão entre a Escola Municipal Clarindo Cassimiro e a UniverCEMIG;
- Baixo número de derivações na rede elétrica de média e baixa tensão, facilitando a implantação da rede PLC entre a escola e a UniverCEMIG;
- Custo viável de implantação estimado pela empresa fornecedora de serviços e equipamentos PLC.

Figura 2 – Definição da Localidade [5].

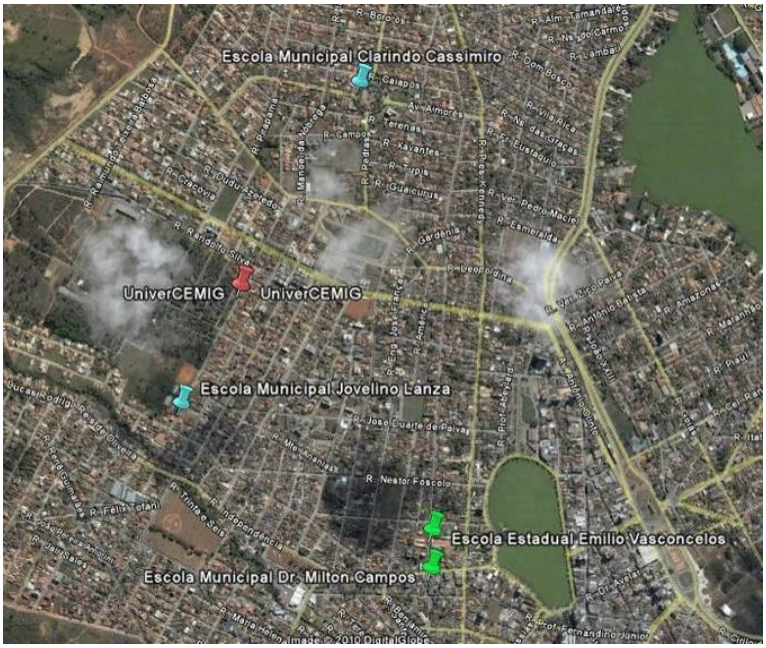
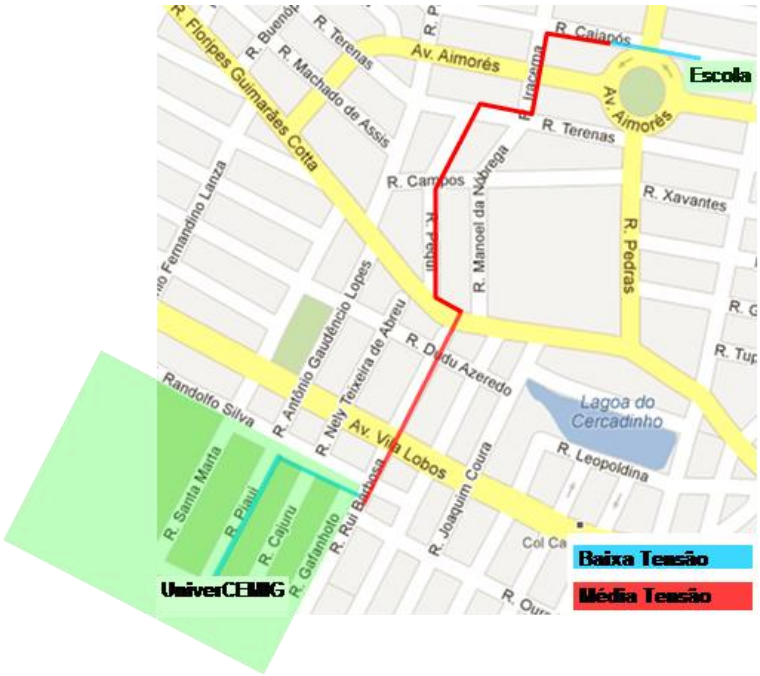


Figura 3 – Estrutura de rede de MT e BT para a unidade piloto.



G. Implantação

A implantação foi dividida em duas partes: a primeira em laboratório, para a realização de testes funcionais, e a segunda em campo, para os testes sistêmicos.

a) Implantação em Laboratório

A implantação da rede PLC em laboratório e o site survey do local de instalação foram realizados entre os dias 25 e 28 de abril de 2011 pela fornecedora de serviços e equipamentos PLC.

As Figuras 4 e 5 apresentam respectivamente a topologia e a foto da rede PLC em laboratório.

Figura 4 – Topologia implantada em laboratório [8], [15].

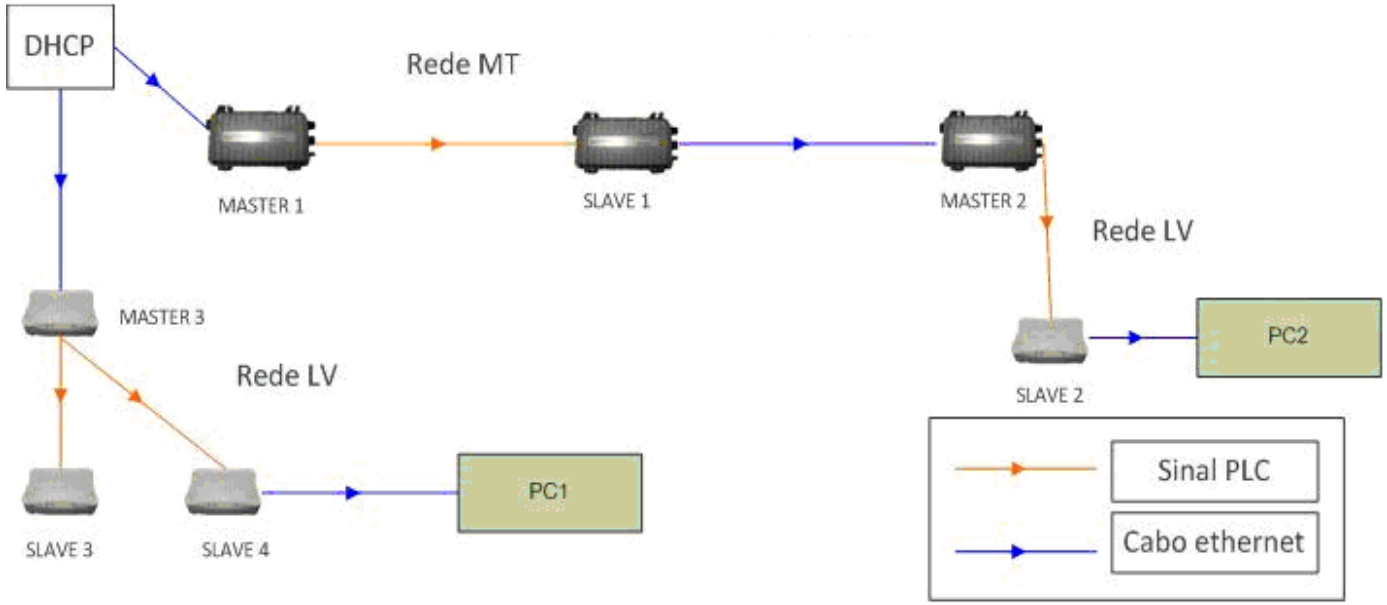
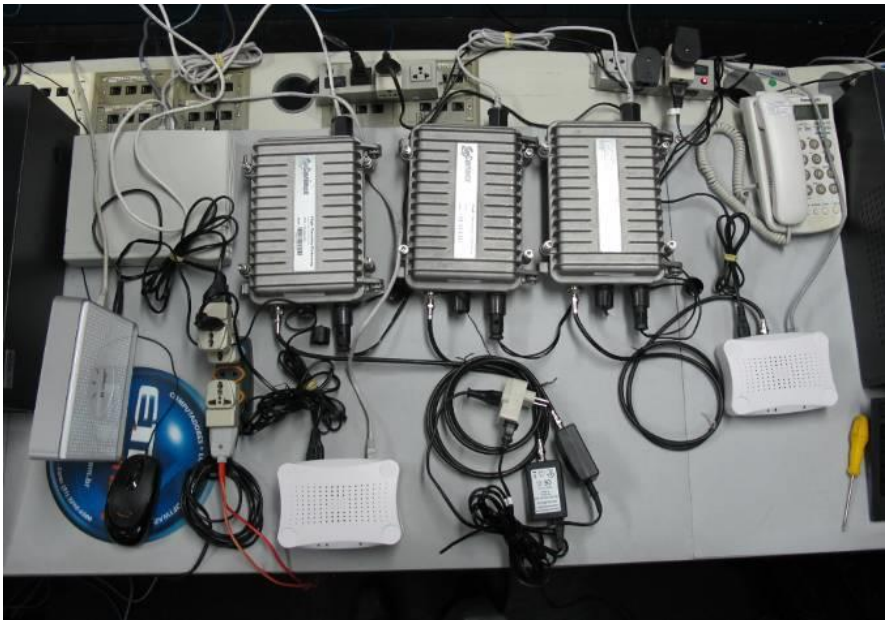


Figura 5 – Foto da rede PLC em laboratório [8], [15].



A rede PLC instalada na FITec era constituída de 3 trechos, sendo todos em baixa tensão com uma parte simulando uma rede de média tensão. A rede foi instalada utilizando um circuito de alimentação a partir das tomadas que alimentam o laboratório. [8],[15]

O trecho 1 tem início em um servidor DHCP, no qual a partir do mesmo utiliza-se um cabo de rede (interface ethernet) que é ligado ao equipamento Master 1 (MT). Esse conecta-se ao Slave 1 (MT) pela rede PLC

O trecho 2 da rede PLC tem início no Slave 1. Utilizando-se outro cabo de rede (interface ethernet), o Slave 1 comunica-se com o equipamento Master 2 e este comunica-se com o Slave 2 (LV) pela rede PLC.

O trecho 3 da rede PLC tem início também a partir do servidor DHCP que é ligado ao Master 3 pelo cabo de rede (interface ethernet). O Master 3 (LV) comunica-se com o Slave 3 (LV) e com o Slave 4 (LV) pela rede PLC.

As injeções de sinal PLC em baixa tensão foram feitas em um único circuito. Os testes foram realizados no circuito que atende o laboratório, sendo que os sinais foram injetados no circuito de tomadas. Os sinais foram medidos em todos os trechos da rede PLC.

Observa-se que todos os valores medidos nas salas do laboratório foram satisfatórios, uma vez que o valor de referência é de -50dbm. A tabela 2 mostra os níveis de sinal obtidos em cada trecho através de um analisador de espectro PLC. [15]

Tabela 2 – Nível de Sinal PLC verificados nos trecho [8], [15].

Trecho e nível de sinal	Registro fotográfico
Trecho 1 (MT) Master 1 – Slave 1 Nível de sinal: -1 dBm	
Trecho 2 (LV) Master 2 – Slave 2 Nível de sinal: -6 dBm	
Trecho 3 (LV) Master 3 – Slave 4 Nível de sinal: -12 dBm	

Os resultados das medições de intensidade de sinal comprovaram que as configurações utilizadas foram satisfatórias para a rede PLC. Todos os pontos de acesso foram devidamente testados e apresentaram conexão satisfatória.

b) Implantação em Campo

Pelo site survey, realizado na cidade de Sete Lagoas, foi possível efetuar uma predefinição dos equipamentos PLC e respectivas quantidades para implantação em campo.

Durante a implantação, iniciada em setembro de 2011, as instalações de acopladores e equipamentos na rede de média tensão foram executadas por equipes da distribuidora local da CEMIG, orientadas pela fornecedora de serviços e equipamentos PLC.

A Figura 6 apresenta um mapa com a localização dos equipamentos, definição dos endereços IP, o modo PLC entre os equipamentos (relativo principalmente a parâmetros de potência e frequência) e a função de cada equipamento e seus módulos (*master, slave, repeater*).

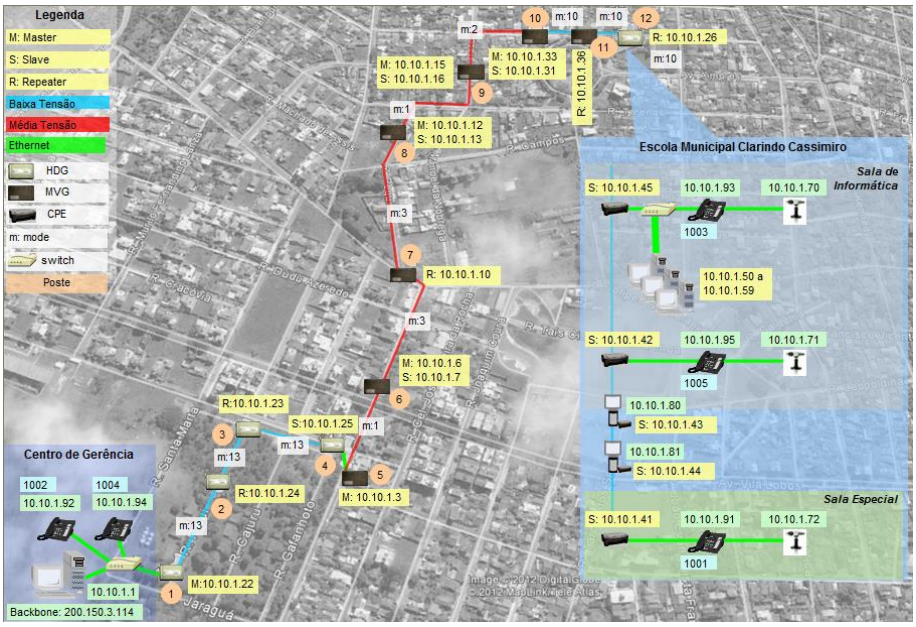
Os equipamentos HDG e MVG, instalados em ambiente outdoor, transmitem o sinal de dados nas redes de baixa e média tensão.

O acoplamento destes equipamentos à rede de média tensão é feito através dos acopladores MT, interligados a isoladores, que têm a função de isolar o sinal elé-

trico (média tensão/60Hz) dos sinais de alta frequência, sinais de dados PLC, assim como isolar os surtos de tensão.

O HDG possui um único módulo e pode assumir a função de master, slave ou repeater. Já o MVG possui três módulos, cada qual podendo assumir uma função específica.

Figura 6 – Mapa com a localização e configuração dos equipamentos.



Os CPEs, instalados na rede de baixa tensão da escola, em ambiente indoor, convertem os dados entre as interfaces PLC e Ethernet.

Durante a instalação dos equipamentos PLC, as medições foram realizadas localmente por um analisador de espectro específico para a tecnologia PLC. Com esse instrumento, é possível determinar os melhores locais de instalação e a melhor faixa de frequência a ser configurada em cada trecho.

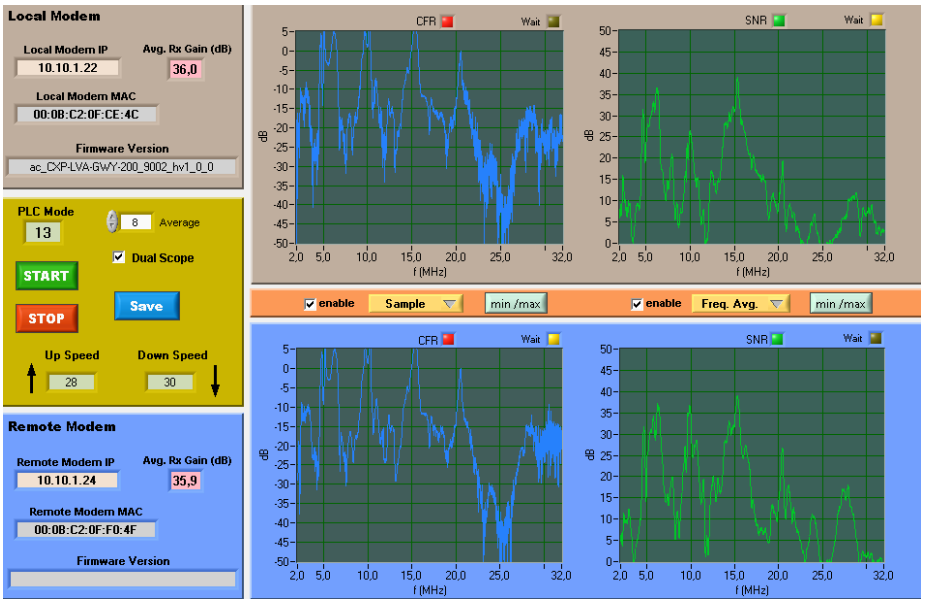
A Figura 7 apresenta uma leitura obtida a partir do poste 2. A potência do sinal recebido de -23dBm garantia boa recepção de sinal no local. Decidiu-se dessa forma instalar um HDG repetidor para cobrir o sinal PLC do poste 2 ao 3.

Após a instalação dos equipamentos, as medições foram realizadas através do servidor do centro de gerência ou de um notebook conectado a um CPE, MVG ou HDG, executando o programa SNRViewer, para chipset DS2, que é uma ferramenta capaz de fornecer informações sobre a relação sinal/ruído (SNR) e o throughput entre dois equipamentos PLC, nos dois sentidos de um canal.

Figura 7 – Leitura obtida na rede de baixa tensão do poste 2 [14].

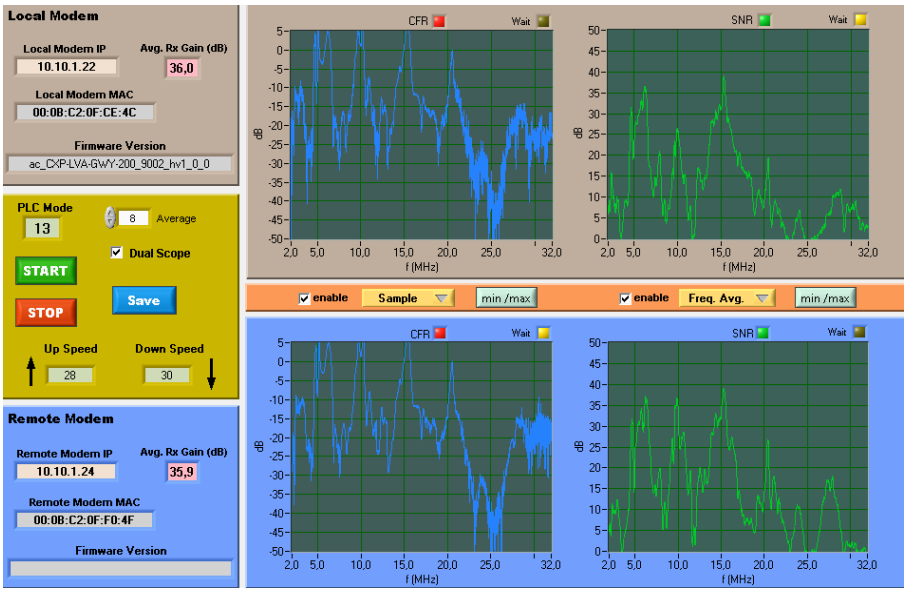
A Figura 8 mostra uma das medições efetuadas com o SNRViewer, entre dois HDGs. Pode-se observar boa relação sinal-ruído (40dB) e *throughput* (28 e 30 Mbps)

Figura 8 – SNRViewer (HDGs - postes 1 e 2) [16].



A Figura 9 mostra uma medição realizada entre dois MVGs. Observa-se baixa relação sinal-ruído (23 e 15 dB) e *throughput* (5 e 2 Mbps). Posteriormente, o modo PLC foi reconfigurado de 2 para 3, melhorando consideravelmente o sinal PLC entre eles

Figura 9 – SNRViewer (MVGs - postes 2 e 3) [16].



As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam algumas fotos das instalações dos equipamentos PLC em Sete Lagoas e dos terminais de usuário na Escola Municipal Clarindo Cassimiro.

H. Avaliação de Demandas Sociais

Com o intuito de elaborar uma metodologia de avaliação de impacto de projeto de inclusão digital, foi realizada uma pesquisa, de caráter exploratório no dia 28 de setembro de 2010. O objetivo dessa coleta de dados foi mapear as percepções, atitudes e opiniões que estudantes da Escola Municipal Clarindo Cassimiro possuíam em relação ao uso da internet. Esse processo se deu com a permissão e apoio da diretoria da escola e a pesquisa foi de caráter qualitativo/quantitativo. [7].

A Figura 14 mostra a placa PLC CPE instalada no terminal público do tipo totem, permitindo o acesso à Internet através da rede PLC.

Figura 10 – HDG instalado no poste 4 [16].

Figura 11 – Instalação do MVG no poste 8 [16].

Figura 12 – Instalação dos terminais de usuário na escola [16].

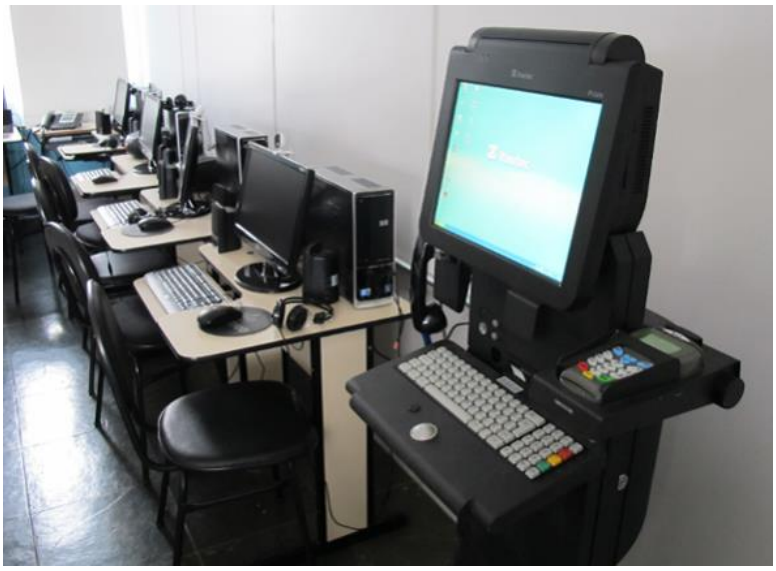
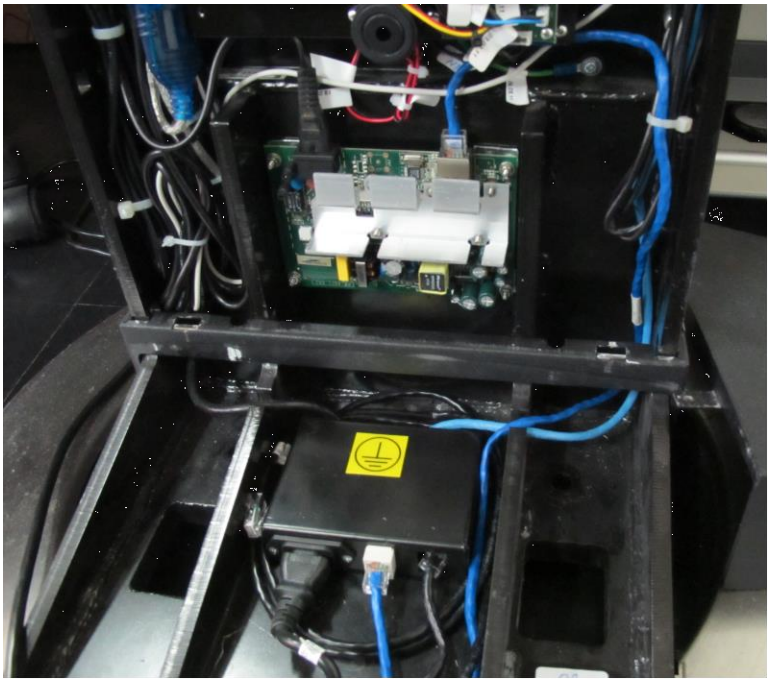


Figura 13 – Instalação dos terminais de usuário na escola [16].

Figura 14 – Placa CPE instalada no terminal público [17].



O universo da escola era então constituído por 482 alunos do sexo masculino e feminino, na faixa etária de 3 anos a 11 anos. No turno da manhã estudavam 234 alunos, 40 alunos no infantil e 194 alunos distribuídos entre o 1º e o 5º período do ensino fundamental. O 1º e o 2º período possuíam apenas uma turma cada, enquanto os demais possuíam duas turmas cada. No turno da tarde estudavam 248 alunos, 113 alunos no infantil e 135 alunos entre 1º e o 3º período. O infantil possuía 6 turmas no total, enquanto o 1º período possuía duas e o 2º e 3º apenas uma cada. Foram entrevistados 24 alunos entre a 3ª série e a 5ª série, dos períodos da manhã e da tarde, na faixa etária de 8 a 11 anos. Na Tabela 3 é apresentado um extrato que retrata a relação dos alunos com a questão digital.

Tabela 3 – Classificação quanto ao conhecimento de informática.

Núm. de entrevistados	Sabe para que serve um computador	Sabe o que é a internet	Não sabe para que serve um computador	Não sabe o que é a internet
6	6	3	0	3
6	5	2	1	4
6	6	3	0	3
6	4	2	2	4
24	**21**	**10**	**3**	**14**

A literatura contemporânea sobre a inclusão digital ressalta o fortalecimento da educação e da cidadania como uma justificativa para realização de projeto sobre inclusão digital. Na análise dos dados percebe-se pela quantidade de respostas que o uso educacional da internet é considerado relevante pelos entrevistados. No que se refere à posse e acesso a computador, as entrevistas mostram que a maioria dos entrevistados não possui acesso a computador em casa. Os dados indicam que os discentes necessitam de informação básica sobre o uso e utilidade tanto do computador quanto da internet.

I. Treinamento e Avaliação de Impacto

Foi realizado um acompanhamento de integração da comunidade do projeto a partir de uma pesquisa realizada com alunos e professores. Tanto as professoras quanto os alunos reconheciam que a Internet era de grande valia para a escola, sendo um meio para aprimorar a prática profissional, aprofundar o conhecimento, adquirir habilidades que poderiam ser úteis tanto na escola como fora dela [9].

Na pesquisa foram identificadas professoras que não sabiam utilizar o computador e nem a Internet. O mesmo em relação aos estudantes. Seria necessário que a implantação da Internet fosse seguida de um curso introdutório à informática e à Internet.

Havia a necessidade de se considerar neste projeto de inclusão digital escolar os alunos com necessidades especiais, visto que a escola estava começando a receber alunos com essas características.

Foi salientada a necessidade de se criar uma equipe de apoio técnico e pedagógico para as professoras e alunos, para a utilização dos equipamentos. No entanto, não se sabe ainda como garantir tal tipo de apoio. Este apoio pode ser relevante para uma utilização mais sustentável dos equipamentos a serem implantados. A escola talvez tenha que pensar sobre o funcionamento do equipamento para que docentes e discentes tenham acesso a ele quando necessitarem, dentro do horário de funcionamento escolar.

A fim de promover a inclusão digital, foram feitos treinamentos em três turmas (9, 7 e 6 professoras respectivamente) [10]. Treinar as professoras apresentou-se como uma prioridade, já que certo número delas não possuía acesso a internet e nem a computador e se sentiam intimidadas diante da tecnologia e, em alguns casos, diante dos próprios alunos, já que eles sabiam mais sobre internet e computador do que elas. Uma vez treinadas, as professoras poderiam trabalhar como agentes de reprodução de informação, além, obviamente, de aprimorar suas atividades. Esta melhoria seria decorrente da facilidade de pesquisa de material que a internet provê para os professores, que podem ser utilizados em sala de aula. Por outro lado, a sala de informática passaria a ser utilizada como sala de aula. Para que os alunos pudessem fazer uso de aplicativos, fazer pesquisa e outras atividades didáticas. As aulas aplicadas foram: Aula 1 - Iniciação básica a computação; Aula 2 - Passo a passo computação; Aula 3 – Word; Aula 4 – Excel; Aula 5 - Power Point; Aula 6 - Internet 1; Aula 7 - Internet 2; Aula 8 - Internet 3.

Foi realizada também uma avaliação dos treinamentos realizados [11].

A implantação da Internet na escola trouxe modificações em sua rotina. Em resumo, os principais pontos a serem considerados são os seguintes [11]:

- Tanto as professoras quanto os alunos reconhecem que a Internet é de grande valia para a escola. Ela é um meio para aprimorar a prática profissional, aprofundar o conhecimento, adquirir habilidades que podem ser úteis tanto na escola como fora dela.
- Existem as professoras que não sabiam utilizar o computador e nem a internet. Com o treinamento, passaram a fazer uso dos equipamentos de informática em suas aulas. Houve casos em que elas resolviam suas dúvidas em relação à Internet ou ao computador pedindo ajuda aos alunos. Estabeleceu uma relação de ajuda entre eles. De qualquer modo, a ideia de um curso introdutório à informática e a internet deve ser algo constante já que a escola sempre recebe novos alunos e professores (nesse caso em menor escala) e dentre eles pode haver aqueles que não possuem conhecimento para lidar com informática e internet.
- Existe a necessidade de que se inclua neste projeto de inclusão digital escolar os alunos com necessidades especiais, visto que a escola está começando a receber alunos com estas características.
- Foi salientada a necessidade de se criar uma equipe de apoio técnico e pedagógico para as professoras e alunos, para a utilização dos equipamentos. No entanto, não se sabe ainda como garantir tal tipo de apoio. Este apoio pode ser relevante para uma utilização mais sustentável dos equipamentos a serem implantados.
- A escola talvez tenha que pensar sobre o funcionamento do equipamento para que docentes e discentes tenham acesso a ele quando necessitarem, dentro do horário de funcionamento escolar.
- Reconhecer o desafio de se garantir não apenas acesso, mas também a inclusão ao mundo digital. Ou seja, que por meio do acesso os alunos possam se instrumentalizar de tal forma que possam tirar melhor proveito do aprendizado e passar a obter conhecimentos que lhe possam ser úteis no futuro.

Deve-se ressaltar que, entre os entrevistados (professoras e alunos), a Internet é vista de modo positivo em relação à atividade escolar. Por outro lado, os alunos necessitarão de apoio técnico para poder utilizar adequadamente a Internet.

Outra observação refere-se ao papel das docentes no processo de aproximação do aluno à Internet. Em algumas respostas, os alunos afirmaram que eles buscavam informações na Internet a partir de orientações fornecidas pelas professoras. Ou seja, além dos pais, as professoras podem ter um papel fundamental no modo pelo qual os estudantes venham a utilizar a Internet, influenciando no modo pelo qual os alunos utilizam o computador e a Internet.

O cotidiano dos entrevistados ainda não foi afetado pela Internet como se pode observar entre jovens de níveis econômicos mais abastados. Ninguém faz parte de rede social. Dominantemente o relacionamento com os amigos dos entrevistados se dá de modo presencial. A postura dos pais influencia o modo pelo qual o estudante utiliza a Internet e o computador na sua residência. Nesse sentido a família pode ter um papel positivo, se ela busca disciplinar tal utilização e orienta na direção do processo educativo. Isto deve ser contraposto ao risco da internet se tornar uma espécie de babá, ou seja, um meio de controle da criança quando o adulto não pode dar atenção a ela. Nesse período pode ser que a internet acabe absorvendo a atenção da criança sem que seja garantido um retorno social e educacional para ela.

Em termos de procedimentos de estudo, a Internet se faz presente entre aqueles que possuem acesso. No entanto, neles o livro ainda se faz presente. Por outro lado, entre aqueles que não possuem acesso à Internet, o livro é o principal suporte para se realizar as atividades escolares. Entre esses, ninguém reclamou de não ter acesso à Internet.

Com a implantação da Internet na escola, não se pode se descurar da biblioteca. Ela terá que ser fortalecida para que não seja subutilizada pelos alunos e até pelos professores. A Internet deve ser compreendida como um meio auxiliar de informação junto com a biblioteca.

Para finalizar, percebe-se que a Internet pode ser um fator positivo no cotidiano e na formação dos alunos. Por outro lado, os alunos deverão ser preparados para que possam utilizar da Internet como meio de apoio ao estudo. Esta preparação deve levar em conta que a Internet não apenas agiliza as atividades escolares como também abre outros espaços de informação e relacionamento para os estudantes. Nesse sentido, a direção da escola e os professores são atores fundamentais para garantir que os estudantes possam usufruir, da melhor maneira possível, as oportunidades provenientes da utilização da internet na vida escolar.

J. Relatório Final do Escopo Técnico

Foi elaborado o relatório final do escopo técnico, contendo a avaliação final da estrutura implantada, histórico, conclusões e recomendações do projeto. Destaca-se um modelo de implantação de uma infraestrutura de rede de comunicação e serviços de inclusão digital utilizando a rede de distribuição de energia elétrica, através do uso da tecnologia PLC banda larga. Os assuntos tratados no modelo foram: Classificação da rede PLC quanto às taxas de dados e quanto ao ambiente da rede elétrica; Principais equipamentos e suas funções; Acessórios e ferramentas para campo; Itens referentes à regulamentação; Recomendações quanto aos locais de implantação; Perfis de usuários e aplicações correspondentes; Especificação da arquitetura e do diagrama da rede de comunicação; Principais requisitos técnicos da rede de comunicação PLC; Definição de recursos materiais e humanos especializados para instalação, configuração e manutenção dos equipamentos; Análise técnico-econômica comparativa entre os potenciais fabricantes/fornecedores; Re-

comendações quanto ao site *survey*; Documentação dos pontos observados durante o site *survey*; Detalhamento da infraestrutura de comunicação; Planejamento dos testes com base nas métricas de análise de desempenho da rede de comunicação e dos serviços prestados em campo; Atividades e recomendações para a implantação da infraestrutura da rede PLC em laboratório, caso os testes dos equipamentos em laboratório sejam necessários; Atividades e recomendações para a implantação da infraestrutura da rede PLC em campo; Exemplo de relatório para o teste de comissionamento.

K. Relatório Final do Escopo Social

Foi elaborado o relatório final do escopo social, contemplando as conclusões da parte social e a metodologia de avaliação de impacto de ações sociais, que foi testada junto aos membros da escola e mostrou ser útil para a gestão escolar. Os assuntos tratados na metodologia foram: Instruções para a Realização da Coleta de Dados; Instrumento de Coleta de Dados para o Corpo Docente; Sugestão de Instrumento de Coleta de Dados para o Corpo Discente.

O instrumento é predominantemente qualitativo com algumas questões apresentando opções a serem marcadas de acordo com a perspectiva da entrevistada. A vantagem da abordagem qualitativa é que ela permite explorar e entender o sentido que os indivíduos dão para as questões sociais ou humanas, nesse caso para o processo de instalação dos equipamentos de informática e Internet no dia-a-dia da escola.

L. Realização da transferência de tecnologia

Durante o processo de implantação da rede PLC em campo, as equipes de distribuição da concessionária obtiveram o conhecimento necessário para a implantação dos equipamentos PLC, assim como receberam informações importantes sobre a tecnologia e seu funcionamento.

Para a transferência dos resultados alcançados durante a execução do projeto, foi realizado um workshop de encerramento, divulgando tanto o escopo técnico quanto o escopo social do projeto.

O workshop, realizado no dia 25 de março de 2013, teve um caráter mais amplo de divulgação e de transferência tecnológica acerca dos produtos gerados no projeto.

M. Viabilidade Econômica

Este projeto tem consonância com iniciativas de inclusão digital, atualmente com grande visibilidade especialmente no Brasil, e com ações de Responsabilidade Social Empresarial (RSE), uma tendência mundial que está relacionada ao conceito de investimento social, não como filantropia, mas como ferramenta para inserção no mercado globalizado e como instrumento para aumento da competitividade.

Hoje a responsabilidade social e política de meio ambiente fazem parte das estratégias de negócio das empresas do setor energético. A CEMIG investiu em 2011

cerca de R$ 15,2 milhões em cultura, beneficiando diretamente a população de diversos municípios do Estado de Minas Gerais.

O projeto desenvolveu um modelo de implantação de redes de comunicação digital que é também uma alternativa importante de investimento social, com garantia de grande visibilidade perante a sociedade, seus clientes e investidores. O projeto consumiu, no período de três anos, aproximadamente 7,35% do valor que a CEMIG investiu em cultura em 2011, sem contar o valor investido em outras ações de responsabilidade social.

A criação do modelo de referência de implantação de uma rede PLC banda larga para iniciativas de inclusão digital é resultado das experiências e dificuldades encontradas no projeto. O modelo estabelece diretrizes básicas para uma implantação mais eficiente utilizando tecnologia de acesso PLC banda larga, de forma que seja possível utilizá-la em outras localidades, quando da necessidade de novas implantações PLC/BPL.

O projeto apresenta como retorno os seguintes benefícios:

- Promoção do desenvolvimento econômico de localidades carentes atendidas pela concessionária. O emprego das tecnologias de informação e comunicação modernas pro-move o desenvolvimento econômico da localidade na medida em que são utilizadas como ferramentas, por exemplo, de exploração de treinamento em informática de jovens, adultos e crianças, aumentando assim as suas chances de colocação no mercado de trabalho. O aumento da produtividade econômica traz consequentemente o crescimento do consumo de energia e redução da inadimplência, aumentando o retorno do investimento para o atendimento da localidade;
- Publicidade pela exposição positiva do nome da empresa nos meios de comunicação em âmbito nacional, através da divulgação imediata na escola, da iniciativa de inclusão digital, aproveitando espaço que os meios de comunicação dedicam atualmente para a divulgação deste tipo de iniciativa;
- Consolidação da imagem como empresa moderna e socialmente responsável.

Fazendo uma rápida análise diante de futuras implantações, a título de ilustração, tomemos como base a implantação de uma rede PLC/BPL em uma rede de energia de baixa tensão com equipamentos da Corinex. Dois tipos de equipamentos seriam utilizados: HDGs (como *master* ou *repeater*) e CPEs (como *slave*). Se considerarmos o preço de cada CPE a R$ 500,00 e o preço de cada HDG a R$ 2.000,00, cobrindo 20 pontos de atendimento, teríamos 20 CPEs e, no mínimo, 2 HDGs, dependendo da distância do ponto de acesso. Supondo um custo total de serviços de instalação de R$ 5.000,00 e manutenção semanal a R$ 50,00, temos: CPE: (20 unidades + 2 sobressalentes) x R$ 500,00 = R$ 11.000,00; HDG: (2 unidades + 1 sobressalente) x R$ 2.000,00 = R$ 6.000,00; Instalação: R$ 5.000,00;Servidores, *softwares* e acessórios: R$ 7.000,00; Custo total da Instalação: R$ 29.000,00; Custo total anual de manutenção: R$ 2.600,00 (52 semanas x R$ 50,00); Em 5 anos,

seriam gastos R$ 42.000,00. Considerando amortização de 5 anos, teríamos um custo mensal de R$ 700,00 cobrindo 20 pontos de atendimento ou R$ 35,00 por ponto de atendimento. O PNBL prevê a prestação do serviço de internet de 1 Mbps ao valor máximo de R$ 35,00, já incluído o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), ou ao valor de R$ 29,90 nos estados em que não há cobrança do imposto.

Pode-se concluir que a tecnologia PLC/BPL entra como um nicho de mercado, como por exemplo, em regiões desprovidas de infraestrutura de rede de dados. Ela não consegue competir com outras tecnologias de escala, contudo poderia entrar como tecnologia complementar de última milha.

4.3 Resultados

A. Escopo Técnico

Os equipamentos PLC foram instalados no percurso geoelétrico entre a UniverCEMIG e a escola. Os terminais de autoatendimento, computadores, telefones IP, câmeras IP e switch foram instalados na sala de informática e na sala especial da escola. Dois telefones IP e um switch foram instalados no centro de gerência na UniverCEMIG.

Foram realizados os seguintes testes simplificados durante a implantação dos equipamentos PLC:

- A disponibilidade dos equipamentos da rede PLC foi monitorada utilizando o comando PING do Windows, no servidor do centro de gerência. Eles foram monitorados a cada minuto por um período que variava de 1 a 3 dias. Estes testes foram feitos basicamente no mês de setembro de 2012. Os resultados mostraram a indisponibilidade dos equipamentos, sendo que o último equipamento instalado passou de 80% a 8% em relação ao primeiro, no período de um mês. Esta melhora ocorreu devido a dois fatores: a inclusão de um MVG na baixa tensão no poste 11 no dia 12 de setembro e a melhora na resistividade do ponto terra nos postes onde foram instalados os MVGs, fato ocorrido entre os dias 6 e 18 de setembro;
- Os equipamentos foram monitorados através do aplicativo SNRViewer, onde foi possível a análise da relação sinal-ruído e do *throughput* entre eles, ajudando na tomada de decisão sobre a melhor configuração a ser utilizada nos equipamentos. Pelos dados obtidos, o *throughput* médio entre os equipamentos foi de 21 Mbps e o SNR médio foi de 28 dB.

O período de implantação, iniciado em setembro de 2011, passou por diversas dificuldades, dentre elas:

- Alocação restrita da equipe de linha viva para instalação dos equipamentos na rede de média tensão em período integral, uma vez que a equipe atende outras atividades na região de Sete Lagoas. Devido a esta restrição, grande parte dos equipamentos foi instalada sem o suporte do fornecedor de equipamentos e

serviços PLC, que dependia da atuação da equipe de linha viva para intervenção na rede elétrica de média e baixa tensão;

- Três HDGs foram danificados no período de chuvas ocorrido entre os meses de dezembro de 2011 e janeiro de 2012. Não havia número suficiente de equipamentos HDG reserva e os custos de exportação dos equipamentos danificados e importação de novos equipamentos fornecidos pela fabricante de equipamentos PLC era alto e não estava previsto. A equipe da fabricante foi pessoalmente à FITec em Belo Horizonte no final de junho de 2012 para efetuar a troca dos três HDGs;
- Em julho de 2012, analisando a disponibilidade do HDG do poste 4, verificava que este enviava resposta apenas em determinados períodos, sendo que em meados do mês de julho o equipamento passou a não enviar mais resposta para o servidor. No final de julho, verificou-se que árvores estavam interferindo no funcionamento da rede elétrica, causando problemas de intermitência de energia para alimentação de um dos HDGs. Após a poda, a alimentação do HDG voltou e o sinal PLC foi normalizado;
- Alguns MVGs instalados começaram a apresentar perda de configuração a partir de outubro de 2012. Este problema começou a ocorrer periodicamente e está sob investigação do fabricante.

B. Escopo Social

Pode-se dizer que a implantação dos equipamentos na escola junto com o treinamento das professoras proporcionou mudanças na escola. Uma delas refere-se à desconfiança delas em relação a projetos deste tipo. Anteriormente, a escola serviu de local para outro projeto de inclusão voltado para jovens (de idade superior ao dos seus alunos), mas sem ter a permissão de se utilizar os equipamentos alocados para aquele projeto. Isto gerou uma desconfiança entre o corpo docente, que ficou refletida nos primeiros contados e nas primeiras entrevistas que foram feitas. O treinamento serviu para superar essa desconfiança. Além disso, ele fomentou certa segurança em algumas professoras que antes tinham receio em relação à informática e à internet. Outra mudança se refere ao modo pelo qual as professoras elaboravam e ministravam suas aulas. Houve, aos poucos, a inserção da internet no processo de trabalho delas, seja no momento da pesquisa de material para aula, seja ao ministrar a aula. A internet, por exemplo, é um meio muito útil de pesquisa para as professoras e alunos. Esses resultados podem ser considerados como passos iniciais de inclusão digital escolar. Por outro lado, para a escola e a secretaria de educação existem pelo menos dois desafios: o primeiro refere-se ao aprofundamento do uso da informática e da internet no ensino, e o segundo aos esforços necessários para a garantia de manutenção dos equipamentos ao longo do tempo.

4.4 Conclusões

O P&D Cemig/Aneel nº 272 projetou e construiu um sistema protótipo de acesso a internet banda larga utilizando a tecnologia PLC. Este projeto foi uma oportunidade de desenvolvimento tecnológico e social, trabalhando além do sistema piloto e demonstrativo, a questão da inclusão digital.

A Cemig obteve com o projeto dados técnicos e definições tecnológicas que a permitem replicar o modelo, se este for o caso. Do ponto de vista social, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação de impactos, para análise da inclusão digital.

A FITec consolidou-se como uma entidade capacitada para avaliar e integrar sistemas PLC gerando demanda por serviços e consultoria.

A escola se beneficiou exercendo a inclusão digital. Os resultados deste projeto contribuem com a sociedade na medida em que atua de forma a reduzir a distância social e de conhecimento, podendo atuar-se na construção de uma sociedade mais justa. Cabe dizer que os resultados alcançados, como a introdução da internet no processo de trabalho docente e em sala de aula podem significar em mais acesso dos docentes e discentes a diversas fontes de pesquisa e informação em geral, além de aprendizado de novas habilidades que podem ser úteis em termos profissionais.

Quanto à viabilidade de implantação de uma rede PLC, foi concluir que:

- A falta de fabricantes e fornecedores de equipamentos BPL (Broadband over *Power Line*) no mercado, o alto custo dos equipamentos BPL, principalmente os de média tensão e o alto custo dos serviços de instalação da equipe de linha viva são fatores preocupantes para as concessionárias na exploração da rede BPL, principalmente nas redes de média tensão;
- O site survey é uma das etapas mais importantes para o sucesso da implantação da rede de comunicação. Recomenda-se realizá-la com o fornecedor/fabricante, equipe de projeto e equipe de distribuição da concessionária. Deve ser feita uma inspeção visual nos percursos geoelétricos, identificando derivações, chaves, fusíveis e demais elementos da rede elétrica, que constituem obstáculos para o sinal PLC;
- É imprescindível, para uma implantação bem sucedida de uma rede PLC, o suporte local do fornecedor de serviços de instalação dos equipamentos PLC e a disponibilidade da equipe de linha viva;
- A utilização de um analisador de espectro tanto para um levantamento das condições de transmissão nas instalações elétricas como ferramenta de análise do sinal PLC durante a instalação dos equipamentos é essencial para uma implantação bem sucedida de uma rede PLC. É possível a instalação dos equipamentos em determinados pontos sem o uso de um analisador de espectro, porém a implantação não será otimizada, ou seja, pode-se ter uma maior

quantidade de equipamentos de forma desnecessária e baixa qualidade de sinal em determinado trecho, comprometendo a implantação;

- Observa-se que o mercado apresenta um crescimento com relação a aplicações de tecnologia PLC banda estreita, para uso em redes inteligentes;
- Para a implantação de uma rede PLC, por tratar-se de um serviço de telecomunicações, deve-se atender as regulamentações, destaque para as Resoluções 375 da Aneel e 527 da Anatel, ambas de 2009. O serviço deve ser previamente autorizado e os equipamentos PLC devem ser certificados pela Anatel;
- Como proposta de pesquisa, cita-se a exploração do PLC aplicado a geração distribuída e a redes inteligentes, como também a exploração de possibilidades de acesso à internet através da rede elétrica, levando em consideração as regulamentações vigentes e o estudo de sua viabilidade econômica.

Capítulo 5

Capítulo 5: Estabelecimento de proposta metodológica para elaboração do balanço energético do estado de Minas Gerais[5]

***Resumo* – O BEEMG (Balanço Energético do Estado de Minas Gerais) é elaborado pela Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), de acordo com a metodologia estabelecida pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), responsável pela elaboração do BEN (Balanço Energético Nacional). São apresentados, neste documento, dados sobre o consumo e a produção energética dos setores do estado de Minas Gerais. Com eles, é possível alinhar estratégias para a ampliação de investimentos em determinados setores, visando, principalmente, aumentar a utilização de recursos alternativos (renováveis) neste contexto. Com isso, observa-se a importância para o desenvolvimento de uma metodologia mais moderna, ou aprimorada, que considere as atuais perspectivas mundiais, e que apresente resultados mais aproximados da realidade dos setores. Neste sentido, o presente artigo trata da apresentação do Projeto de P&D Cemig GT 474, que propõe o estabelecimento de nova metodologia para a elaboração do balanço energético de Minas Gerais. Os resultados do projeto estão consolidados em dois BEEMG´s (referentes aos anos base de 2009 e 2010; 25º e 26º, respectivamente), e suas aplicações são abordadas no final deste artigo.**

5.1 Introdução

Balanço energético (BE) é um documento através do qual é divulgada a contabilidade relativa à oferta e ao consumo de energia numa região. Tal contabilidade considera as atividades e fluxos relacionados com a exploração e produção de recursos energéticos primários, a conversão em formas secundárias, as contas de importação e exportação, a distribuição e uso final da energia, geralmente com periodicidade anual.

Atualmente, o Balanço Energético do Estado de Minas Gerais (BEEMG) é elaborado pela Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), através da Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas e coordenado pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (SEDE). A partir dos dados fornecidos pelo balanço, sobre a matriz energética estadual, o BEEMG atua de forma a documentar e direcionar as políticas e programas voltados às questões energéticas, visando ao desenvolvimento sustentável de Minas Gerais.

A Fundação João Pinheiro (FJP) realizou um diagnóstico que detectou a necessidade de melhoria no processo de construção do balanço energético, indicando a

[5] LANA, L.T. C.; SILVA, C. H. F. da; COSTA, J. C. E.da; OLETO, R.R.; MADUREIRA, A. J. V..

execução de um sistema estatisticamente estruturado que permitisse a transparência dos dados e de suas operações matemático-estatísticas de sustentação.

A situação motivou o desenvolvimento do projeto P&D Cemig GT 474 - PB – ESTABELECIMENTO DE PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ELABORAÇÃO DO BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, que se iniciou em setembro de 2011 e encerrou-se em julho de 2013. Os custos do projeto totalizaram-se em R$546.429,78, e teve como instituição participante a Fundação João Pinheiro (FJP).

O projeto teve, como objetivo, estabelecer uma proposta metodológica compatível com aquela desenvolvida pela EPE para elaboração do BEEMG, porém, incorporando melhorias. Estas baseadas no estabelecimento de novas correlações e métricas de conversão para geração de dados relativos à produção e consumo de energéticos em diversos setores.

Cumprindo com as exigências feitas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, a busca por anterioridade foi realizada, não sendo encontrados registros no Banco de P&D da ANEEL, nos anais de eventos genéricos do setor elétrico, ou em consultas públicas da ANEEL. Em relação às normas e regulamentos nacionais, foi encontrado o documento “Procedimentos de Elaboração de Balanços Energéticos”, publicado em 2005, pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Nesta mesma busca, foram encontradas metodologias muito bem estruturadas na abordagem de contabilizações energéticas, baseadas na padronização das unidades de coleta dos energéticos, na elaboração dos fatores de conversão pelos poderes caloríficos, na contabilização da eletricidade gerada por processos não combustíveis, na classificação das atividades econômicas, no nível de agregação das fontes energéticas, na análise de qualidade dos dados e na delimitação do sistema. Tais metodologias pertencem à organizações nacionais, como IEA (International Energy Agency), Eurostat (Órgão Oficial de Estatística da Comunidade Europeia), Olade (Organização Latino-Americana de Energia) e United Nations Statistics Division.

Considerando estudos realizados por universidades, a Coppe (Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia da UFRJ), entre 2004 e 2005, elaborou o documento "Estudos Técnicos de Aperfeiçoamento da Metodologia de Elaboração do Balanço Energético Nacional - BEN". Ainda assim, atualmente, tal documento já se encontra desatualizado, justificando a pesquisa proposta pelo P&D GT 474.

O presente artigo pretende dar um panorama geral sobre o desenvolvimento do P&D 474 e apresentar alguns resultados.

5.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Projeto Sustentável

Considerando a atual preocupação com o desenvolvimento sustentável dos estados, e ainda, considerando a emergente necessidade de diversificar matrizes energéticas, o projeto P&D GT 474 apresenta importante relevância em relação ao impacto socioambiental.

O aperfeiçoamento da metodologia para a elaboração do Balanço Energético do Estado de Minas Gerais pode contribuir para identificar, avaliar e propor investimentos nas detectadas oportunidades de uso de alternativas energéticas. Tal situação poderá, de maneira sustentável e econômica, diversificar a matriz energética estadual. Ou seja, deixa-se para trás a maneira não relacionada ou não otimizada de aproveitamento energético no estado, e passa-se a identificar, à longo prazo, uma complementariedade entre os energéticos, utilizando recursos pouco explorados (solar e eólico) e a produção integrada de carvão e gases.

B. Metodologia

A Cemig, como principal motivadora do projeto, disponibilizou todas as informações necessárias aos estudos que seriam feitos pela FJP, além de ter fornecido o apoio necessário à realização do mesmo. A construção da metodologia foi fragmentada por setores, sendo assim, dividida em etapas.

Uma primeira abordagem em busca de informações (além das já fornecidas pela Cemig) foi realizada nas entidades de classe representativas dos setores produtivos: associações locais e regionais, sindicatos e federações. Tal abordagem mostrou-se ineficiente no tocante às informações requeridas para a pesquisa.

O desafio seguinte foi construir uma amostra a partir de bases de dados existentes e confiáveis. Foram definidas como ponto de partida as bases de dados disponibilizadas pela Federação das Indústrias de Minas Gerais (FIEMG), da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) e da Secretaria Estadual da Fazenda – MG (SEF/MG). O acesso às informações envolveu negociações diversas por serem dados considerados sensíveis e até, em alguns casos, requererem acordos escritos sobre a manutenção de sigilo.

Antes da definição da amostra, foi preciso primeiramente determinar como os setores industriais pesquisados pelo BEEMG seriam classificados de acordo com a da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), elaborada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Essa definição é importante, porque as bases de dados da RAIS e SEF/MG seguem este parâmetro de classificação, ou seja, somente a partir dela foi possível definir junto à SEF/MG a participação de cada empresa dentro de um setor industrial do balanço.

A adoção dos códigos CNAE requer adequações constantes. Por causa disso, foi proposta uma classificação inicial em 2012, discutida com a Cemig. Após as pesquisas do primeiro ano, percebeu-se que o agrupamento dos códigos CNAE de três dos 12 setores do balanço (siderurgia integrada, siderurgia não integrada e

alimentos/bebidas) não tinha logrado resultados confiáveis. Então, em 2013 foram realizadas reuniões com a Cemig para a reclassificação das empresas do setor siderúrgico pelo código CNAE.

O próximo passo foi verificar a quantidade de empresas por cada setor industrial definido, segundo as bases de dados. Lembra-se que aqui está sendo feita referência às bases de dados relativas ao ano de 2011. O número de empresas na RAIS era de 25.093 e, na SEF/MG, de 6.318. A divergência dos números pode ser explicada, primeiramente, pelo fato de a SEF/MG considerar apenas as empresas ativas e que possuem faturamento em 2011 e a RAIS considerar o número de empregados formais registrados. Além disso, o preenchimento das informações da RAIS dá-se pelas empresas com o foco apenas nas questões trabalhistas, o que pode gerar incorreções na autoclassificação. Por isso, o número da SEF/MG pareceu ser mais confiável para definição do universo de empresas por setor industrial. Optou-se por trabalhar, desta forma, com a base de dados da SEF/MG. As demais bases serviram, em alguns momentos posteriores, de fontes de informações para acesso às empresas, principalmente os seus telefones e endereços.

Por causa das restrições legais de envio de dados individuais de cada empresa (sigilo fiscal), foi negociado com a SEF/MG que a FJP solicitaria informações por agrupamento de empresas por setor. Assim, a FJP preparou uma lista das maiores e/ou mais representativas empresas de cada setor. As fontes de informação para a construção desta lista foram diversas, desde a própria Cemig, a RAIS (que cita o número de empregados por empresa), a FIEMG e a publicação das 500 maiores empresas pela revista Exame. À SEF/MG foi solicitada a taxa de concentração (% de arrecadação) de cada agrupamento dentro de cada setor. Construiu-se, desta forma, uma proxy que permitiu a extrapolação dos dados para universo das empresas de cada setor. Assumiu-se que dentro de um mesmo setor as empresas de porte semelhante têm processos produtivos semelhantes.

O próximo passo metodológico foi buscar nas empresas as informações necessárias pra a construção do balanço energético. Duas questões foram abordadas nesta etapa: a discussão do questionário enviado (junto à Cemig) e o levantamento das informações das empresas para realizar o contato. Os questionários remetidos, a princípio, foram os mesmos utilizados historicamente pela Cemig. Vale destacar que, após o primeiro ano de pesquisa, já no início do ano de 2013, o questionário de pesquisa foi reelaborado pela FJP (e validado pela Cemig), tendo sido identificado que o modelo anterior não era muito claro no seu preenchimento nem objetivo na coleta das informações desejadas. A fim de estabelecer o contato, foi pesquisado, para cada empresa da amostra, o responsável pelo setor de produção, com seu respectivo número de telefone e endereço eletrônico. Tal levantamento partiu das informações das bases de dados citadas anteriormente, buscas na internet e contatos telefônicos. Uma vez identificado o responsável pela informação requerida, foram encaminhados os questionários que investigaram o consumo e/ou produção energética de cada empresa. Os questionários preenchidos foram devolvidos à FJP. Terminado esse processo, foi estimada a participação das empresas que res-

ponderam os questionários dentro de cada setor e, através da representatividade das respostas, foi extrapolado o consumo energético.

A pesquisa de campo enfrentou uma grande dificuldade, dado o receio de muitas empresas em fornecer dados. Foi necessário, muitas vezes, fazer inúmeras ligações telefônicas para convencer as empresas pesquisadas a responderem e devolverem o questionário encaminhado totalmente preenchido. Em alguns poucos casos foi necessária uma visita à empresa para viabilizar o preenchimento do questionário. A necessidade da coleta presencial das informações era avaliada pelo porte e significância percentual da organização no grupo a que a empresa pertencia, como em Uberaba (MG) e em Belo Horizonte (MG). Algumas poucas empresas se recusaram taxativamente a responder o questionário. Outras não responderam sem, entretanto, explicarem o motivo. A lista utilizada no primeiro ano (2012) resultou num total de 271 empresas que responderam às pesquisas. Em 2013 a amostra foi aumentada para 416 empresas pesquisadas. O maior número de empresas pesquisadas em 2013 se deu em função da expertise gerada com a pesquisa anterior e da busca de resultados mais expressivos.

Já que nem todos responderam ao questionário, criou-se, a partir daí, um procedimento de recorrer à SEF/MG em busca dos dados da participação relativa de um grupo de empresas respondentes somente depois de obter as respostas. Desta forma, ficou garantido o sigilo fiscal exigido por lei e fielmente cumprido pela SEF/MG. Este procedimento visou garantir maior exatidão na representatividade da amostra e rigor no posterior processo de extrapolação.

. A extrapolação(que será tanto melhor quanto maior o número de respostas e respectivo aumento das porcentagens de faturamento) foi realizada via proporcionalidade relativa, como descrita nas seguintes equações:

$$A_j = \sum E_{i,j} * \frac{1}{P_k} \quad (1)$$

$$B_k = \sum A_j \quad (2)$$

em que:

A = consumo total do energético (mil tep)

B = consumo total do setor (mil tep)

E = energético

P = representatividade das respostas

i = indicativo de empresa (varia de 1 a n)

j = tipo de energético (varia de 1 a m)

k = indicativo de setor (varia de i a q)

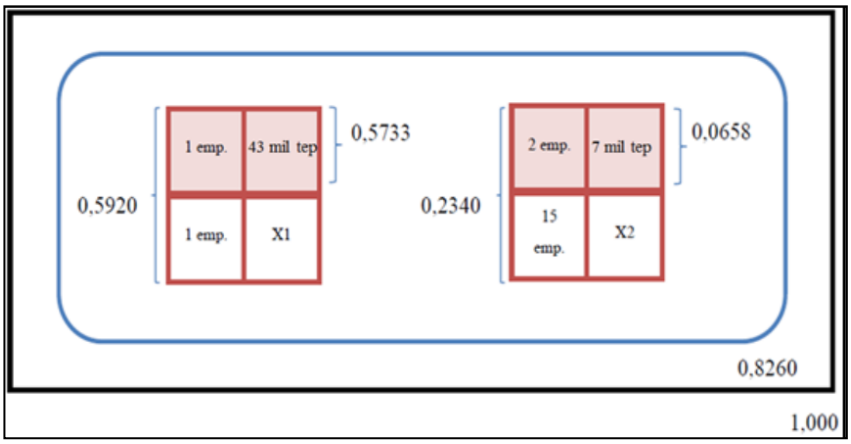
Esse procedimento simples carece de algum critério, especialmente aquele que busca a extensão proporcional aritmética para empresas de mesma importância dentro do setor. Essa extensão proporcional aritmética não é aconselhada para ex-

trapolações de resultados de empresas cuja participação relativa nos energéticos e/ou setores é de pequena monta.

Assim, cada setor foi hierarquizado a partir do faturamento vinculado ao Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (ICMS) e fornecido pela Secretaria de Estado da Fazenda de Minas Gerais (SEF/MG). Nesta hierarquização, as empresas foram ordenadas decrescentemente pelo faturamento anual atingindo 30%, 40%, 50%, ou outra porcentagem mais ajustada ao setor. Ocorre, de maneira comum, que uma, duas ou algumas poucas empresas representam parte significativa destas porcentagens ou concentração e outra quantidade grande de empresas representa parte insignificante da listagem. Com isso, o procedimento de proporcionalidade para a extensão do valor energético amostral teve de obedecer à representatividade de cada grupo, fazendo-se a estimativa dentro de cada grupo e somando-os para a totalização.

O procedimento, a partir de um exemplo com os dados do setor Papel e Celulose, com o Gás Natural como energético, foi realizado conforme a Figura 1:

Figura 1 – Proporção aritmética.



Etapa A	Etapa B	Etapa C	Etapa D
43 : 0,5733	7 : 0,0658	X1+ X2 = 69,36	69,36 : 0,8260
X1 : 0,5920	X2 : 0,2340		Y : 1,000
X1 = 44,07	X2 = 25,29		Y = 83,98

A proporção (taxa de concentração) total fornecida pela SEF/MG para as 19 empresas inicialmente listadas foi de 0,8260.

- Destas 19 empresas, duas apresentaram 0,5920 de proporção (concentração) total e as outras 17 apresentaram 0,2340;

- Das duas empresas, apenas uma preencheu o questionário de pesquisa e sua proporção (concentração) foi de 0,5733 para 43 mil tep (tonelada equivalente de petróleo) consumidos de energético. Assim, a estimativa do valor energético para essas duas empresas foi obtida através de uma regra de três simples, conforme exposto na Etapa A;
- Para as 17 empresas inicialmente pesquisadas, apenas 2 responderam ao questionário e elas somaram 0,0658 do total. Proporcionalizando essa concentração no total das 17 empresas, as 7 mil tep destas duas empresas foram proporcionalizadas com o total de 0,2340, segundo a Etapa B.

Pode-se perceber que a extrapolação no primeiro grupo (que teve uma empresa respondente e uma empresa não respondente) levou ao resultado de 44,07 tep e no segundo grupo (que tem duas empresas respondentes e 15 empresas não respondentes), levou ao resultado de 25,29 tep. Ou seja, o total foi de 69,36 tep (Etapa C), correspondendo ao total de 0,8260. Este é o total dentro da amostra; para chegar ao total do universo, foi realizado mais uma vez o processo de proporcionalidade aritmética, que gerou o resultado de 83,98 tep (Etapa D).

Quanto à metodologia para os setores residencial e comercial, introduziu-se também uma novidade para a estimação do consumo de carvão vegetal. Foram solicitados à Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) e à Subsecretaria de Controle e Fiscalização Ambiental Integrada (SCFAI) os dados referentes à quantidade anual de emissão de Selo de Origem Florestal (SOF), para assim estimar o consumo de carvão vegetal nos setores residencial e comercial, os quais foram usados nos resultados. O consumo residencial foi então calculado da seguinte maneira:

$$Residencial = \sum Lenha + \sum GLP + \sum Eletricidade + \sum Carvão \quad (3)$$

Em que:

Residencial = consumo residencial total dos diversos energéticos.

Lenha (Ckg) = consumo médio de lenha por domicílio (CMe), multiplicado pelo número de domicílios (NDom) que utilizam lenha para cozinhar, conforme a equação a seguir. O número de domicílios proveio dos Censos Demográficos de 1960, 1970, 1980 e 1991, da Pesquisa Anual por Amostra de Domicílios (PNAD, do IBGE) de diversos anos e da Pesquisa de Amostra de Domicílios (PAD/MG, da FJP) de 2009 e 2011:

$$C_{kg} = C_{Me} * N_{Dom} \quad (4)$$

GLP = consumo residencial de gás liquefeito de petróleo, fornecido pela Agência Nacional de Petróleo (ANP).

Eletricidade = consumo residencial de energia elétrica, fornecido pela Cemig e por outras concessionárias (Energisa Minas Gerais, Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas, Cia. Luz e Força de Mococa e Empresa Elétrica Bragantina) que atuam no Estado.

Carvão = consumo total de carvão vegetal (ωi) estimado, que é igual ao somatório da multiplicação da quantidade anual de emissão SOF (α) pela proporção da quantidade de selos por peso do pacote de carvão vegetal (βi) e pelo peso em kg de cada pacote (γi), que por sua vez é multiplicado por 87%, que correspondem à proporção de carvão vegetal consumido no setor residencial, segundo estimativa realizada a partir da quantidade de selos emitidos pelo órgão competente, conforme a equação seguinte:

$$\omega_i = \sum(\alpha.\beta_i.\gamma_i).0{,}87 \quad (5)$$

A melhoria metodológica proposta pela Fundação João Pinheiro para o setor comercial foi a busca de informações dos dados de consumo energético de carvão vegetal junto a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) e a Subsecretaria de Controle e Fiscalização Ambiental Integrada (SCFAI).

Com relação ao setor agropecuário, a metodologia proposta pela Fundação João Pinheiro foi a busca dos dados de consumo energético a partir do Censo Agropecuário, realizado pelo IBGE, que é o levantamento de informações sobre aspectos econômicos, sociais e ambientais da atividade agropecuária acerca dos estabelecimentos agropecuários, florestais e/ou aquícolas dos municípios de um país. A última edição do Censo Agropecuário foi publicada no ano de 2006 . A partir destes dados foi feita uma extrapolação para o ano de 2011.

Esclarece-se ainda que no Censo Agropecuário constam alguns combustíveis que foram consumidos no setor agropecuário, mas que não são usados nesse trabalho. São eles a graxa, o óleo lubrificante, o querosene e o bagaço de cana. Estes combustíveis não entraram no levantamento do balanço energético, porque a graxa e óleo lubrificante são utilizados para a manutenção dos equipamentos agrícolas e não como fonte de energia, o querosene é utilizado para iluminação nas residências rurais, fato já mencionado na análise do setor residencial, e o bagaço de cana é utilizado nas usinas para a fabricação, principalmente, de açúcar e álcool para o setor industrial. Os dados nacionais discriminam o consumo energético separadamente de cada atividade econômica do setor agropecuário, permitindo assim calcular a representatividade das atividades selecionadas.

Observações sobre a metodologia e questões correlatas:

O principal componente da nova metodologia criada está focado na pesquisa direta junto às empresas informantes com o caráter de descrever a realidade do consumo e da oferta de energéticos a partir da própria fonte consumidora ou ofertante. O dado estatístico primário recebido na pesquisa é, desta forma, a matéria prima para estimativas e projeções de cada energético e/ou setor econômico.

Em função disso, a FJP julga ser importante uma continuidade da pesquisa descritiva direta, uma vez que ela fornecerá um banco de dados de informantes, que poderá sempre ser atualizado e aumentado, além de permitir a construção de uma série histórica por empresa e facilitar a comparação dos dados do tempo presente

com os demais do passado. Evidencia-se, assim, uma metodologia de cálculos que é dinâmica e acompanha a contemporaneidade dos fatos para o BEEMG.

Não são ignoradas as dificuldades de manter uma pesquisa desta natureza: é sabido que a taxa de retorno dos questionários, ainda que estimulado por contatos diversos, inclusive por telefonemas, só vai melhorar com o passar do tempo, com a criação de um vínculo forte entre o pesquisado e o pesquisador. Falta, às organizações, percepção sobre a importância da pesquisa; as informações em muitos casos são consideradas estratégicas (e por isso mesmo eram negadas) e foram também identificados casos de atritos entre a organização estudada e a organização fornecedora de energia, entre outros problemas. Isso resultou em outro questionamento: seria o caso de continuar com o sistema de coleta de dados praticado como o envio do questionário através de e-mail, após contatos telefônicos, ou o recomendável seria mudar para uma pesquisa diretamente no endereço da empresa? Poderia se fazer uma coleta mista (direta e indireta)? Ou possivelmente nacionalizar a pesquisa atendendo todos os Estados, sob a supervisão da EPE/Ministério de Minas e Energia? Esta última hipótese foi sugerida pela FJP, que propunha, através de um *workshop* nacional, a tentativa de unificação da metodologia de construção do balanço energético, a troca de procedimentos metodológicos, o aprofundamento da visão crítica quanto à exatidão dos resultados e o estudo adequado do cálculo matricial para aprimorar a construção do balanço energético. Até lá, deve-se trabalhar com as respostas disponíveis, não medindo esforços para sempre aumentar a representatividade relativa daqueles que respondem à pesquisa. A construção de uma base de dados ao longo do tempo permitirá, certamente, refinar também estatisticamente as extrapolações no futuro.

5.3 Resultados

O Projeto P&D GT 474 resultou, principalmente, em melhorias na metodologia para tratamento de dados que visa à contabilização energética no Estado de Minas Gerais, entregue por meio de relatórios, desenvolvida pela Fundação João Pinheiro. Esta última utilizou os conhecimentos, estatísticos e relações econométricas, já utilizados pela mesma, em pesquisas no setor econômico.

Os resultados da aplicação da metodologia resumiram-se na publicação de dois BEEMG´s (referentes aos anos base de 2009 e 2010; 25º e 26º, respectivamente). Os próximos balanços, 27º e 28º, tiveram, respectivamente, seus dados encaminhados pela FJP em dezembro de 2012, e seus dados apurados pela FJP junto às empresas informantes.

A. Aplicação na Cemig

Considerando ser de responsabilidade da Cemig a elaboração do balanço energético estadual, toda melhoria realizada na metodologia envolvida neste procedimento é de caráter representativo. Com isso, a companhia energética pode aproveitar o projeto P&D GT 474 em epígrafe da seguinte maneira:

- Utilizando da metodologia desenvolvida;

- Confrontando o antigo método de elaboração do balanço energético, implementando as melhorias que adequadas;
- Identificando, em bases de dados confiáveis, as oportunidades de geração de energia através das alternativas presentes na região;
- Melhorando o processo interno e a qualidade do serviço prestado;
- Possibilidade de identificar, avaliar e propor ações de aproveitamento dos recursos energéticos, principalmente, os renováveis.

B. Aplicação no Setor Elétrico

O setor elétrico, em quaisquer instâncias, tem o objetivo de planejar, aplicar e gerir o aproveitamento energético dos recursos disponíveis para tal. Atualmente, a matriz elétrica de Minas Gerais é, predominantemente, representada pela energia hidráulica (90%), contando com 19.300 MW de capacidade em usinas hidrelétricas existentes (território e fronteiras).

Entretanto, por uma questão de estratégia, independência e segurança energética, torna-se necessária a diversificação da matriz energética do Estado. Isto se dá pela busca de alternativas energéticas, num processo de recomposição estrutural a médio e longo prazo. Ou seja, a partir do conhecimento do consumo e produção de energéticos do estado, torna-se possível associar o uso regional de diversas fontes energéticas, para a promoção da economia e da independência em relação a uma única fonte de energia. Tal ação pode contribuir para a mitigação do risco de manipulação exercida por instituições que detém grande parte do mercado de energia.

Portanto, o projeto P&D GT 474 buscou atender à necessidade do setor elétrico no domínio estadual de desenvolvimento e implantação de uma metodologia consistente para o tratamento de dados de contabilização energética.

C. Transferência e Difusão Tecnológica dos resultados

A transferência e difusão tecnológica dos resultados do projeto ocorreram de diversas maneiras e formatos.

O primeiro veículo de transferência e difusão é o próprio BEEMG. Ao publicar o balanço energético, a empresa veicula mais amplamente para o público externo, em seu conteúdo, parte das opções metodológicas geradas pelo projeto.

Internamente – da FJP para a Cemig – foram vários os processos de transferência difusão dos resultados. Durante todo projeto existiram reuniões periódicas entre os membros da entidade contratada (FJP) e os técnicos da entidade contratante (Cemig). Nessas reuniões técnicas eram expostas as opções metodológicas e ações realizadas, com o propósito de validar a metodologia e transferi-la com os conceitos e métodos propostos.

Relatórios metodológicos intermediários serviram para deixar registradas as etapas e métodos praticados. O relatório final registrou, de forma completa, toda a metodologia proposta.

Em alguns momentos do processo foram realizadas apresentações para os interessados da Cemig, de maneira a transferir também a metodologia e divulgar os resultados alcançados.

A FJP apresentou também, em 2013, para a comunidade interessada na questão energética, no IV Fórum de Inovação Tecnológica (FIT), promovido pela Cemig e de periodicidade anual, a metodologia de apuração do consumo residencial do energético carvão vegetal.

Como sugestão apontada pelos resultados do trabalho estuda-se a possibilidade de realização de um *workshop* com a EPE (que desenvolve este trabalho a nível nacional) e algumas empresas de energia estaduais. A ideia é compartilhar a metodologia e suscitar críticas e contribuições para seu aprimoramento. Um anseio presente é padronizar a metodologia em escala nacional, o que poderia ser fruto de um workshop desta natureza e amplitude.

5.4 Conclusões

A realização de projetos de pesquisa e desenvolvimento é de grande importância para o crescimento sustentável do país, principalmente abordando setores estratégicos, como o energético.

Atualmente, o BEEMG é consultado por diversas instituições, todas buscando informações sobre a quantidade de energia disponível e energia consumida no estado de Minas Gerais. Esse retrato do setor energético, representado em tal material, direciona pesquisas e investimentos, com isso, sua elaboração e resultados devem ser cada vez mais confiáveis e baseados.

O projeto descrito neste artigo buscou, portanto, tal valorização, fornecendo melhorias na metodologia utilizada para a elaboração do BEEMG.

Capítulo 6

Capítulo 6: Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico[6]

***Resumo* – O projeto, identificado como CEMIG/ANEEL-008 – Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico, tem por objetivo o desenvolvimento, até o nível pré-industrial, de células a combustível utilizando membrana trocadora de prótons (*Próton Exchange Membrane* – PEM), estacionárias, de pequeno porte, tendo como combustíveis o hidrogênio (*Direct Hydrogen Fuel Cell* – DHFC) e o etano sem reforma externa (*Direct Ethanol Fuel Cell* – DEFC). O projeto, desenvolvido em parceria com Clamper Indústria e Comércio Ltda, sem transferência de ativos entre as partes, conta com a participação da UniTech Ltd e de pesquisadores do Instituto de Química de São Carlos – IQSC/USPSCUSPSC contratados pela Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial - FIPAI.**

6.1 Introdução

As células a combustível deverão representar, no médio prazo, uma importante fonte de energia e a principal tecnologia a ser utilizada na geração distribuída ou descentralizada de energia.

Dentre os diversos tipos de células a combustível, as de polímero condutor iônico têm se destacado como uma importante e promissora tecnologia na geração de energia elétrica seja de forma estacionária, portátil ou veicular.

O projeto CEMIG/ANEEL-008 teve início em fevereiro de 2000 e foi originalmente concebido para ser desenvolvido em três anos (três ciclos), já tendo sido realizadas cerca de 50% das atividades previstas.

6.2 Tipos de Células

Atualmente, as principais células a combustível são:

a) De polímero condutor iônico (PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*): utilizam como eletrólito uma membrana polimérica que permite a troca de prótons de hidrogênio, apresentam rendimento de cerca de 40 a 50%, trabalham a temperaturas em torno de 60 a 80 ºC e têm sido desenvolvidas em potências variando de 1 W a 250 kW (ver Figura 1);

b) Alcalinas (AFC – *Alkali Fuel Cell*): utilizam como eletrólito hidróxido de potássio em meio aquoso, apresentam rendimento de cerca de 70 %, trabalham a temperaturas variando entre 80 e 200 ºC e têm sido desenvolvidas em potências variando de 300 W a 3 kW (ver Figura 2);

[6] DINIZ, J. H.; QUADROS, S. V. T. de; GARCIA, J. L. Á.; LOBO, A. R.; FERREIRA, A. C.; CAIRES, M. I. Publicado em Congresso em Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2001, Brasília. I Citenel, 2001.

Figura 1 – Célula de Polímero Condutor Iônico.

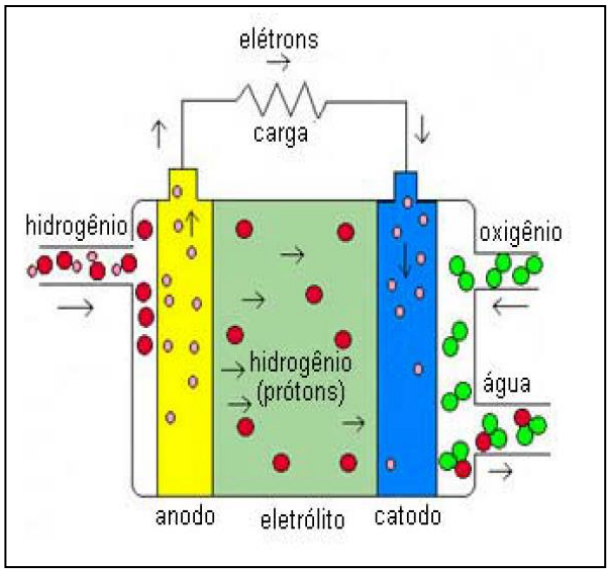
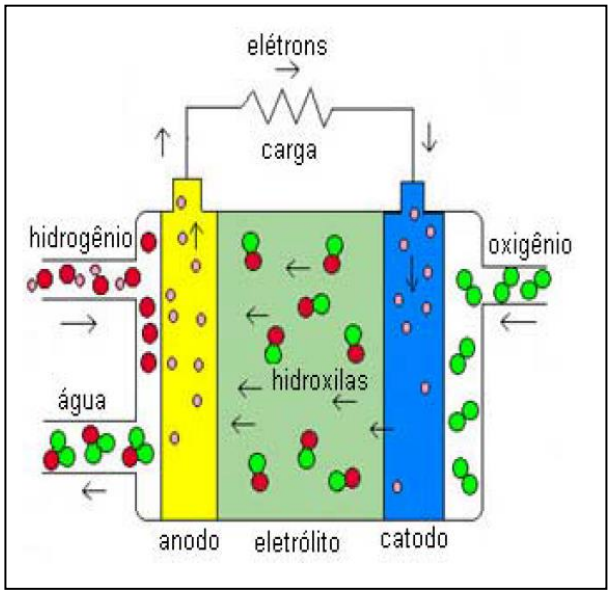
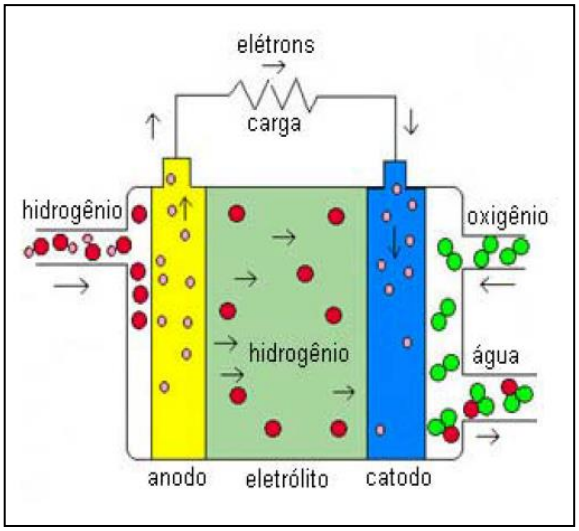


Figura 2 – Célula Alcalina.



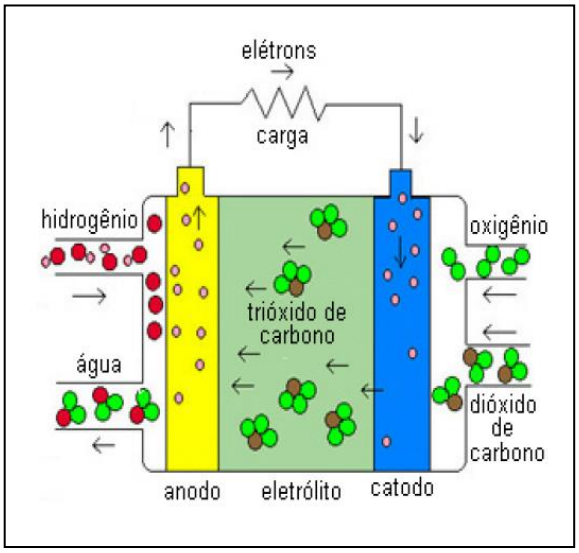
c) De ácido fosfórico (PAFC – *Phosforic Acid Fuel Cell*): utilizam como eletrólito ácido fosfórico, apresentam rendimento de 40 a 80%, trabalham a temperaturas da ordem de 200 ºC e têm sido desenvolvidas em potências da ordem de 200 kW, sendo que existe projeto de desenvolvimento de célula de 11 MW (ver Figura 30);

Figura 3 – Célula de Ácido Fosfórico.



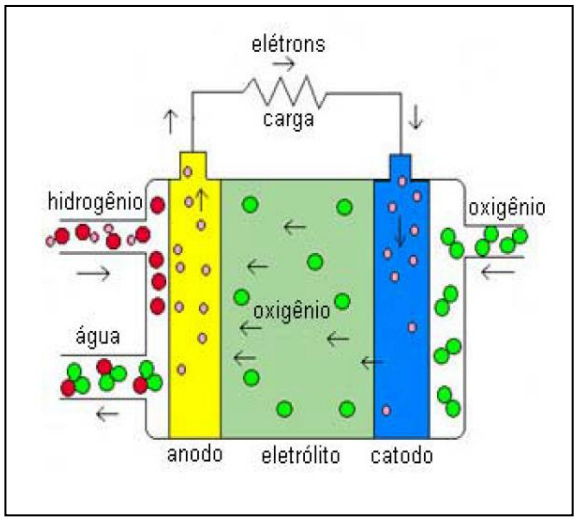
d) De carbonato fundido (MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*): Utilizam como eletrólito carbonato de sódio ou de magnésio, apresentam rendimento de 60 a 80 %, trabalham a temperaturas em torno de 650 ºC e têm sido desenvolvidas em potências variando de 200 kW a 2 MW, sendo que existe projeto de desenvolvimento de célula de 100 MW. Pelas altas temperaturas, permite processo de co-geração (ver Figura 4);

Figura 4 – Célula de Carbonato Fundido.



e) De óxido sólido: utilizam como eletrólito compostos cerâmicos de cálcio ou de zircônio, apresentam rendimento de cerca de 60 %, trabalham a temperaturas em torno de 1000 ºC e têm sido desenvolvidas em potências de até 200 kW. São bastante promissoras, pois permitem processos de co-geração (ver Figura 5);

Figura 5 – Célula de Óxido Sólido.



6.3 Células de Polímero Condutor Iônico

As células de polímero condutor iônico – PEMFC têm se mostrado como sendo as mais promissoras, do ponto de vista tecnológico, associando simultaneamente rendimento, economicidade e produção limpa de energia, grande densidade de carga, reduzindo tamanho e partida rápida, embora não permitam processos de co-geração.

Qualquer que seja o combustível, o energético utilizado nas células PEMFC é sempre o hidrogênio. Na maioria dos casos, o hidrogênio é obtido fora da célula através de reformadores ou por eletrólise da água. As principais fontes de hidrogênio utilizadas atualmente nas células são o gás natural e o propano.

Encontram-se também em desenvolvimento células com utilização direta do metanol em solução aquosa, sendo a liberação do hidrogênio feita no interior da própria célula. Essas células são conhecidas como DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*).

As células a etanol direto (DEFC – *Direct Ethanol Fuel Cell*), ainda em início de desenvolvimento e objeto do presente projeto de pesquisa, apresentam ainda alguns problemas, pois a quebra das ligações químicas carbono-carbono requer mais

energia, exigindo maior temperatura de funcionamento e diminuindo a eficiência do processo de conversão energética.

Ainda assim, resultados preliminares já obtidos com os catalisadores produzidos têm sido bastante encorajadores.

6.4 Projeto CEMIG/ANEEL-008

O projeto, denominado "Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico" integra o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, sob a coordenação da Gerência de Tecnologia e Alternativas Energéticas, nos termos da Lei 9.991, tendo sido aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL em fevereiro de 2000.

O projeto desenvolve pesquisa e tecnologia (escala pré-industrial) de células a combustível de polímero condutor iônico a hidrogênio (*Direct Hydrogen Fuel Cell* – DHFC) e a etanol direto sem reforma externa (*Direct Ethanol Fuel Cell* – DEFC).

Por se tratar de pesquisa inédita no Brasil, e também no mundo em relação ao uso do etanol, tornou-se imprescindível, para a consecução dos objetivos propostos, o domínio da tecnologia de célula a hidrogênio como rota tecnológica para se chegar ao etanol direto, etapa ainda em fase de desenvolvimento.

Culminando a primeira etapa do projeto, foram desenvolvidas duas células a hidrogênio, de 500 W e 1.000 W, que se encontram em fase de testes, constituindo-se nas primeiras células a combustível desenvolvidas e construídas na América do Sul, com tecnologia nacional, representando um marco no desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil.

6.5 Fases do Projeto

O Projeto foi concebido para ser desenvolvido em três etapas, estando a primeira etapa concluída, a segunda em fase final e a terceira em análise pela ANEEL.

Os principais objetivos de cada uma das etapas podem ser resumidos, conforme a seguir:

a) Fase 1 – Ciclo 1999/2000 – Março/2000 a Agosto/2001:

- Pesquisa do estado da arte da tecnologia de células a hidrogênio;
- Especificação e aquisição de materiais e equipamentos;
- Montagem do laboratório de eletroquímica da CEMIG;
- Desenvolvimento de catalisadores para hidrogênio e etanol e testes em laboratório (IQSC/USPSC, CENPES, LACTEC, UFMG, UNICAMP e laboratório CEMIG);

- Concepção, montagem e testes de protótipos de 500 W e 1 kW a H_2;
- Desenvolvimento de *software*s de acionamento, controle e supervisão;
- Recursos contabilizados de acordo com a Lei 9.992: R$ 760.000,00 (contrapartida CEMIG).

b) Fase 2 – Ciclo 2000/2001 – Abril/2001 a Março/2002:

- Desenvolvimento de catalisadores para hidrogênio e etanol e testes em laboratório;
- Investigação e ensaios para determinação dos intermediários formados na reforma do etanol;
- Concepção, montagem e testes de células unitárias e protótipos de pequena potência a etanol direto;
- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de periféricos e *software*s e integração da células em unidades portáteis *stand alone*;
- Recursos contabilizados de acordo com a Lei 9.991: R$ 840.000,00 (CEMIG).

c) Fase 3 – Ciclo 2001/2002 – Fevereiro/2002 a Dezembro/2002:

- Desenvolvimento de pesquisas de produção de catalisadores usando diferentes técnicas;
- Desenvolvimento e teste de protótipo de célula a etanol de 500 kW;
- Testes e aperfeiçoamento da célula a etanol (rendimento, vida útil, envelhecimento acelerado, confiabilidade, etc.);
- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de periféricos e *software*s de controle;
- Integração e compactação dos sistemas;
- Desenvolvimento de especificações e transferência para a indústria;
- Recursos a serem contabilizados de acordo com a Lei 9.991 : R$ 800.000,00 (CEMIG).

6.6 Conclusões

Embora ainda haja um longo caminho a percorrer, principalmente no que se refere ao desenvolvimento da célula a etanol direto, o projeto tem se mostrado bastante acertado e apresentado resultados preliminares bastante encorajadores.

O modelo de parceria adotado no projeto, tem se revelado acertado e bastante desafiador, pois agrega culturas e conhecimentos distintos de uma concessionária do setor elétrico (CEMIG – responsável pela concepção final do projeto e pela sua coordenação junto à ANEEL e pela contratação de pesquisadores e fornecedores

de equipamentos e serviços), de uma empresa privada do setor industrial (*Clamper* – autora da ideia original, detentora de patentes que possibilitaram a concepção do projeto na área do etanol e da competência na integração de sistemas eletrônicos), de uma empresa privada da área de pesquisa e desenvolvimento (*UniTech Ltd* – detentora de know how no desenvolvimento de células hidrogênio) e universidade (IQSC/USPSC – com a reconhecida competência de seus pesquisadores e cientistas nas áreas de produção de hidrogênio e em células a combustível).

Finalmente, deve-se ressaltar que a aprovação, por parte da ANEEL, do projeto e dos recursos financeiros associados, assim como as orientações e as demandas pelo cumprimento das ações aprovadas, têm sido de fundamental importância para o bom andamento do projeto em referência e para o fomento do desenvolvimento de tecnologia nacional.

Capítulo 7

Capítulo 7: Aplicações de Nanotubos de Carbono em Membranas de Troca Protônicas para Células Combustíveis[7]

***Resumo* – O uso de hidrogênio para a produção de energia, utilizando células a combustível, vem se desenvolvendo no mundo de forma intensa. Entretanto, existem diversos gargalos tecnológicos a serem superados. Nas células a combustível do tipo PEM (Proton Exchange Membrane), as principais barreiras estão associadas com o desenvolvimento de novas membranas poliméricas e tecnologias e procedimentos para a redução da quantidade de catalisador. Neste sentido, as técnicas de nanotubos de carbono (CNT) se mostram promissoras. Essencialmente, a relevância deste trabalho encontra-se associada na viabilização técnica e econômica das células a combustível. Este artigo relata o desenvolvimento de CNT aplicados em células do tipo PEM, para alocação otimizada de platina. Os resultados indicam a aplicabilidade, mas também o longo caminho para a disponibilidade comercial da tecnologia.**

7.1 Introdução

O esgotamento dos combustíveis fósseis e a degradação do meio ambiente estão entre os principais e cruciais problemas enfrentados pela sociedade moderna. Neste contexto, formas de produção de energia que reduzam impactos ambientais têm sido incentivadas e amplamente desenvolvidas.

As células a combustível são equipamentos que realizam uma reação eletroquímica entre o hidrogênio e o oxigênio, puro ou presente no ar, para produzir energia elétrica e calor, tendo como resíduos ou produtos finais apenas o vapor de água.

Este equipamento foi descoberto por William Grove em 1839 e desde então é alvo de pesquisa e desenvolvimento. Mas apenas na década de 1960 é que o sistema de célula a combustível tiveram uma ampla divulgação, devido seu uso pelo programa espacial da NASA.

Na década de 1970 com as crises do petróleo e a busca por fontes renováveis, a ideia da economia do hidrogênio ganhou força, mas foi na década de 2000 com os conceitos de eficiência energética, desenvolvimento tecnológico e inovação, que os sistemas de produção e uso de hidrogênio tiveram a sua generalização.

As células PEM (Proton Exchange Membrane) são compostas, basicamente, de um eletrólito polimérico, o Nafion® (Du Pont), e dois eletrodos: o catodo, (eletrodo do oxigênio) e o anodo (eletrodo do combustível, normalmente o hidrogênio). Ambos os eletrodos são formados essencialmente por duas camadas: a camada di-

[7] SILVA, C. H. F da; MADUREIRA, A. J. V.; PRATES, C. F.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; OLIVEIRA, S.; FIGUEIREDO, J. M. A.; LADEIRA, L. O.. Publicado no VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

fusora de gases (GDL) e a camada catalítica. Estas camadas são suportadas em um tecido de carbono que em conjunto com uma mistura de grafite e PTFE (Politetrafluoretileno) forma a GDL.

A camada catalítica é fabricada, usualmente, pela deposição de suspensões de grafite, solução de Nafion e nanopartículas de platina. Estas camadas em conjunto formam um dos eletrodos e, para a fabricação da célula unitária, dois conjuntos (anodo e catodo) são prensados na superfície do eletrólito em condições específicas. A composição e a microestrutura das camadas dos eletrodos são parâmetros importantes para o funcionamento das células PEM e grandes esforços de pesquisas têm sido dedicados à otimização destas estruturas visando superar os principais obstáculos para a disseminação desta tecnologia. Entre os principais temas de intensa pesquisa na área destacam-se, por exemplo:

- O envenenamento dos catalisadores de platina (Pt) por CO (monóxido de carbono), que pode ser proveniente, por exemplo, de combustíveis reformados;
- A redução dos custos associada à redução da quantidade de platina usada nos eletrodos;
- O aumento da temperatura de operação, a durabilidade e o uso de outros combustíveis.

Estes parâmetros normalmente são correlacionados e estudos visando aprimorar são relevantes [1]-[2].

Pesquisas científicas e tecnológicas recentes indicam que os avanços na tecnologia do hidrogênio deverão vir principalmente da nanotecnologia. Dentre os materiais mais promissores encontram-se os nanotubos de carbono (CNT - em inglês: *Carbon nanotubes*). Esses materiais em escala nanométrica possuem propriedades extraordinárias como rigidez mecânica, grande área superficial e alta condutividade elétrica, requisitos fundamentais e necessários para a sua utilização como eletrodos em células combustíveis [3].

O objetivo central deste trabalho envolve a substituição da fase carbonácea tradicional, o grafite (G), por CNT, desenvolvendo assim um processo de produção de eletrodos de CNT de qualidade, a um custo mais baixo e que possam aumentar a eficiência de geração de energia das células tipo PEM.

A metodologia empregada foi a experimentação, definida baseada no estado da arte da tecnologia e de forma a atender aos requisitos desejáveis do projeto.

Como principais resultados pode-se citar o desenvolvimento CNT aplicáveis a células a combustível, juntamente com um conhecimento e visão panorâmica sobre o tema que permita ver que ainda existe a necessidade de grandes avanços na tecnologia de forma a, de fato, tornar comerciais as células a combustível, mesmo tendo o projeto obtido sucesso em seus objetivos.

Quando o projeto foi concebido, havia a expectativa não somente de aplicação dos nanotubos em células a combustível, mas também a possibilidade de exploração comercial com ganhos em royalties e patentes. Finalizado o projeto, a maior apli-

cabilidade para a Concessionária de energia encontra-se associada com o conhecimento e competência desenvolvida ao longo do projeto, e que subsidia o posicionamento estratégico frente a tecnologia.

Este projeto (PD-4951-0228/2007) foi realizado na parceria Cemig GT e Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais e foi concluído em Julho de 2011.

7.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Nanotubos de Carbono

Desde a descoberta dos fulerenos e, posteriormente, dos nanotubos de Carbono, a ciência ganhou um impulso gigantesco. O que foi visto desde então foi um grande esforço da comunidade científica como um todo para desenvolver o que hoje chamamos de Nanociência e Nanotecnologia [4].

Os Nanotubos de Carbono (CNT) são alótropos do carbono com uma nanoestrutura cilíndrica. Estas estruturas foram construídas com diâmetro de comprimento na proporção de 132,000,000:1, significativamente maior do que para qualquer material. Estes cilindros de moléculas de carbono possuem propriedades incomuns e que são de altíssimo valor no campo da nanotecnologia, eletrônica, óptica e outros campos tecnológicos da ciência dos materiais. Particularmente, devido as suas extraordinárias propriedades de condução térmica, mecânica e elétrica, os nanotubos de carbono podem ter aplicações que possibilitem inúmeras melhorias nas estruturas dos materiais [5].

Os CNT podem ser de parede única (*single-wall*, SWNT), Figura 1, ou de paredes múltiplas (*multiple-wall*, MWNT) dependendo do método usado na fabricação. Os de paredes múltiplas consistem em nanotubos concêntricos como mostrado na Figura 2 [6]. Dependendo do diâmetro e da quiralidade do tubo, os SWNT podem ter caráter metálico ou semicondutor. Por quiralidade entende-se pela forma com que a folha de grafite é enrolada no plano do grafite. Algumas das formas possíveis podem ser vistas na Figura 1. Os MWNT apresentam algumas propriedades mais parecidas com o grafite. As interações entre as folhas são do tipo Van der Waals e, dessa forma, todos os MWNT podem conduzir carga, possuindo um caráter metálico [5]-[6].

Figura 1 – Modelos moleculares de SWCNTs exibindo diferentes quiralidades: (a) configuração armchair; (b) arranjo zigzag; (c) conformação quiral.

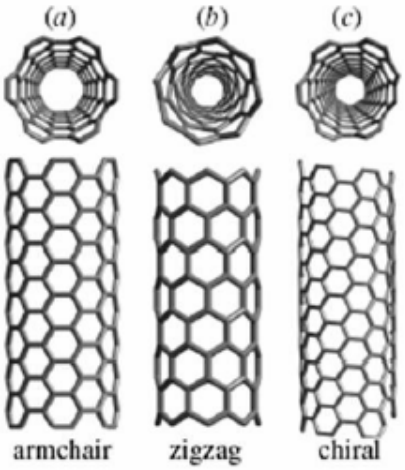
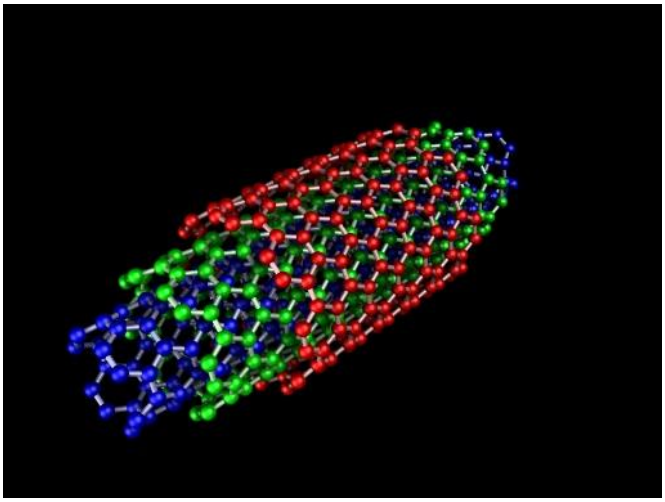


Figura 2 – MCNT do tipo armchair - parede tripla.



Os CNT são muito fortes. Seu módulo de Young é aproximadamente 10 vezes maior que o do aço, o que significa que, para uma mesma deformação, a tensão aplicada sobre o CNT deve ser 10 vezes maior do que aquela aplicada ao aço. Entretanto, ao contrário do que se poderia imaginar, os CNT não são materiais duros ou difíceis de serem dobrados, pois além de serem muito finos, a sua estrutura de anéis carbônicos hexagonais permite que o material altere sua forma ao ser dobrado e então volte à sua posição inicial sem se quebrar [1].

As propriedades pouco usuais dos CNT permitem a sua aplicação em áreas variadas, que incluem eletrodos para baterias, dispositivos eletrônicos, substitutos em compósitos de alta resistência mecânica, etc. Entretanto, para atingir esse potencial de aplicações, devem-se desenvolver métodos para sua a produção em larga escala.

Os métodos usados atualmente para a síntese de SWNT apresentam baixas eficiências, o que faz com que seja alto o seu custo, de aproximadamente US$210 por grama [7]. No caso dos MWTN já foram desenvolvidos métodos de larga possibilitando a redução de custos de USD100-700 por grama para a faixa de USD15-25 [8].

B. P&D Cemig/Aneel nº 228

O projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado "Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis" – P&D CEMIG/ANEEL 228 – faz parte do ciclo 2005/2006. Foi iniciado em Janeiro/2009 e teve o seu encerramento em Julho/2011. Resultou da parceria entre a CEMIG Geração e Transmissão SA (Laboratório de Eletroquímica) e a Universidade Federal de Minas Gerais (Laboratório de Nanomateriais). Seus objetivos foram [9]:

- Desenvolver eletrodos para células combustíveis baseadas em membranas de troca protônica (PEM). Esses eletrodos serão fabricados utilizando matrizes de nanotubos de carbono, que servirão tanto para a condução eletrônica como para o suporte de nanopartículas metálicas de platina (Pt), paládio (Pd), entre outros.
- Aumentar a eficiência de geração de energia das células tipo PEM;
- Redução de seu custo devido à diminuição na quantidade de metais nobres utilizados nos eletrodos;
- Desenvolvimento de protótipo visando um produto comercial.

Tais resultados podem ser aplicados pela CEMIG na melhoria do processo interno de utilização das células a combustível, na redução dos custos em relação à produção e aplicação das células combustível do tipo PEM, na melhor relação custo-benefício nos investimentos em célula a combustível e na atualização das informações técnicas em relação à aplicação dos CNT às células a combustível.

C. Metodologia

Para que fossem atingidos os objetivos do projeto, utilizou-se da seguinte metodologia [9]:

- Revisão bibliográfica e levantamento do estado da arte da tecnologia;
- Desenvolvimento do sistema de crescimento nanotubos em larga escala, usando arco elétrico e deposição química na fase vapor (CVD). O mecanismo de crescimento dos nanotubos ainda é pouco conhecido. Como o metal catalisador é necessário para o crescimento dos SWCNT, tal mecanismo deve envolver o papel dos átomos de cobalto (Co) ou níquel (Ni). Uma proposta de mecanismo sugere que os átomos do metal catalisador se ligam às ligações pendentes nas

entradas do tubo e então giram ao redor da borda da abertura, absorvendo átomos de carbono à medida que se aproximam [10].

- Síntese de nanotubos de carbono usando arco elétrico, CVD e plasma-CVD;
- Purificação e dispersão e funcionalização dos nanotubos de carbono;
- Preparação de nanoparticulas catalisadoras, usando ouro e platina;
- Fabricação de eletrodos por CVD assistido por plasma (PECVD);
- Fabricação de eletrodos de CNT por CVD e em panos;
- Decoração de nanotubos de carbono com partículas catalisadoras, isto é, a alocação de partículas de catalisadores no interior dos nanotubos criando a funcionalidade catalítica;
- Caracterização e otimização de eletrodos de nanotubos de carbono;
- Testes da membrana de CNT/catalisador em células unitárias;
- Protótipo de uma célula do tipo PEM baseada em eletrodos de nanotubos de carbono.

D. Benefícios do Projeto

Para a instituição de ensino, pode-se apontar o desenvolvimento de parcerias com o setor privado com o objetivo de gerar novas tecnologias dentro da universidade com o interesse da indústria, capacitação de equipe com conhecimento técnico na área de nanotubo de carbono de forma a criar massa crítica científica, reconhecimento da UFMG como um centro de excelência em nanotecnologia no estado de Minas Gerais.

Para a CEMIG, tem-se o desenvolvimento de novas tecnologias para promover a diversificação da matriz energética brasileira, juntamente como conhecimento e capacidade técnica para direcionar pesquisas e posicionar estrategicamente a Empresa em assuntos de hidrogênio e suas tecnologias.

Na indústria, o possível interesse na comercialização do produto (célula a combustível do tipo PEM) a ser desenvolvido durante o projeto pode ser um alvo empresarial.

O setor elétrico se beneficia pelo desenvolvimento de fontes alternativas de geração de energia de forma mais limpa e sustentável.

E finalmente, a sociedade tem a possibilidade de redução dos impactos ambientais e da dependência externa de combustíveis fósseis pelo desenvolvimento das células a combustível [10].

7.3 Resultados Obtidos

Os resultados esperados envolvem a obtenção dos seguintes produtos [10]:

- Eletrodos baseados em CNT recobertos com nanopartículas catalisadoras para aplicação em células combustível do tipo PEM;

- Protótipo de uma célula PEM unitária baseada nos eletrodos desenvolvidos;
- Métodos inovadores para os processos de: síntese de CNT em larga escala, purificação e funcionalização de CNT em larga escala, recobrimento de CNT com nanopartículas de metais catalisadores com tamanho controlado e síntese de novos catalisadores para a quebra de H2 e O2 e reforma do etanol.

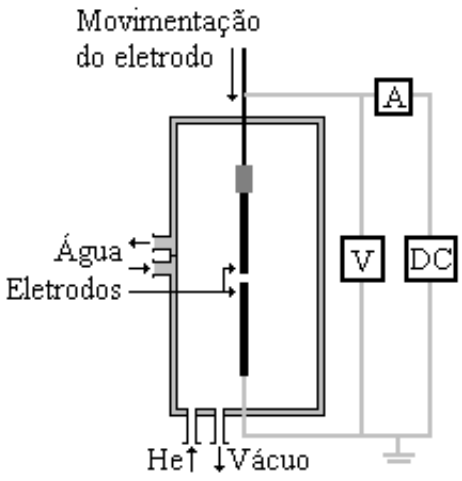
Todos os resultados propostos foram obtidos dentro do projeto. Contudo, é importante ressaltar que a realização do projeto, mais do que um sucesso do ponto de vista de pesquisa, o projeto demonstrou a complexidade da área do projeto, indicando que não é fácil, não é simples, não é barato e de que ainda existe a necessidade de se aprofundar e investir muito antes que de fato a tecnologia seja comercial e traga o retorno financeiro esperado.

A. Síntese por Arco Elétrico

O processo de arco elétrico consiste na montagem de eletrodos de grafite em uma câmara em atmosfera inerte (hélio ou argônio) à baixa pressão. As pontas dos eletrodos são aproximadas até, cerca de, 1 a 2 mm de distância e uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre eles. Quando a distância entre os eletrodos se torna suficientemente pequena, ocorre a formação de um arco elétrico entre os eletrodos, ionizando o gás ao redor do arco e gerando um plasma ao redor dos eletrodos. A Figura 3 mostra um modelo simplificado de uma câmara de arco elétrico com seus principais componentes indicados [10].

A quantidade e qualidade dos nanotubos formados dependem, principalmente, da mistura de metal catalisador e carbono. Os resultados variam de um autor para outro, já que as condições experimentais dependem de vários parâmetros, tais como concentração do metal, pressão do gás inerte, natureza do gás, corrente elétrica e geometria do sistema utilizado para a síntese [10].

Figura 3 – Desenho esquemático de um sistema de síntese por arco elétrico.



A técnica de deposição via arco elétrico é muito eficiente e relativamente simples, porém apresenta um problema que impede sua utilização contínua para a queima de grandes quantidades de grafite e consequente geração de uma maior massa de CNT. Este problema está relacionado à formação de um depósito de carbono grafítico (tipo tubostrático) sobre o catodo, que cresce durante o processo de síntese. Este depósito apresenta propriedades elétricas muito diferentes das apresentadas pelos eletrodos, impedindo que o arco elétrico se mantenha estável e com as mesmas condições do início da síntese [10].

A solução proposta para eliminar o acúmulo de carbono amorfo sobre o catodo sem modificar as condições ideais de síntese gerou uma patente que será descrita a seguir. Neste invento, o eletrodo-anodo não é movimentado durante o processo de erosão, possibilitando a formação de um plasma estável. Além disso, o sistema de armazenamento interno de eletrodos, acoplado com um eixo que permite a troca de eletrodos para a queima, evita a necessidade de abertura da câmara entre cada processo de síntese. A Figura 4 apresenta a câmara de arco elétrico modificada para produção de CNT [11].

Figura 4 – À esquerda é exibida a câmara de arco elétrico modificada para produção de CNT.

Utilizou-se uma modificação de um sistema Czochralski de crescimento de cristais, que consiste em uma câmara de aço de atmosfera controlada, com sistema de refrigeração das paredes, capaz de suportar uma grande amplitude de pressões, entre 10-6 e 104 Torr.

Dois eletrodos de grafite de alta pureza são montados no interior da câmara, sendo que o anodo é dopado com metais catalisadores, como Ni/Y(níquel e ítria) e Co/Ni (cobalto e níquel), em um sistema acoplado a um motor de passo que permite alterar continuamente a distância entre os eletrodos. Os eletrodos são ligados externamente a uma fonte de tensão DC de 30 kW (Saban Eletric Corp.) que opera entre 0 e 35 eV com correntes até 1500 A. Uma janela óptica protegida com um vidro escuro bloqueador de radiação UV é utilizada para acompanhar o processo.

Após o fechamento da câmara, realiza-se uma purga da atmosfera para remoção de oxigênio e outros possíveis contaminantes. A câmara é evacuada até 10-2 Torr e preenchida com hélio, em uma pressão de 500 Torr. O processo de síntese ocorre com a aplicação de um potencial de cerca de 25 eV entre os eletrodos, que são aproximados até uma distância de cerca de 2 mm entre as pontas. No momento em que os eletrodos se aproximam o suficiente para que seja possível a formação de um arco elétrico entre eles, o potencial cai para cerca de 23 eV e a corrente estabiliza-se em 100 A.

Estas condições de diferença de potencial e corrente elétrica foram aceitas como ótimas e repetidas em todos os processos, por gerarem um plasma estável e de alta temperatura, estimada em 4000 K.

Através do controle da corrente elétrica e da pressão, é possível modificar o tamanho da região de plasma e o fluxo de gás na região de interface. O correto ajuste destes parâmetros torna energeticamente favorável a formação de CNT. Após todo o anodo ser desgastado o processo é interrompido e a pressão interna da câmara é igualada à externa.

A câmara é então aberta e a fuligem gerada pelo processo é recolhida das superfícies da câmara, seguindo para a etapa de purificação. A Figura 5 mostra uma foto da parte interna da câmara após uma deposição. Pode-se perceber a formação de uma espécie de manta e grande quantidade de pó aderido à parede da câmara que, aqui, denomina-se fuligem gerada pelo processo de síntese [2].

Em geral, o eletrodo de grafite é preparado com metais catalisadores e após a reação de erosão do anodo observa-se, no catodo, um espesso depósito que contêm nanopartículas grafíticas, metal catalisador encapsulado por carbono, além de uma grande quantidade de fuligem rica em CNT. Este material é composto, aproximadamente, por 50% de CNT, 10% de metais catalisadores e 40% de partículas grafíticas [10].

Figura 5 – Foto da parte interna da câmara após deposição de CNT, usando catalisador C/Ni/Y a 550 Torr em atmosfera de hélio e com 100 A e 17 V.

B. Síntese por Deposição Química na Fase Vapor

O objetivo dessa etapa foi gerar um processo de produção em larga escala com o emprego de uma matriz cerâmica como suporte catalítico. O desenvolvimento deste processo demandou grande esforço e dedicação, ora na busca do catalisador ora na otimização dos parâmetros, como fluxo de gases, temperatura e tempo de síntese [11].

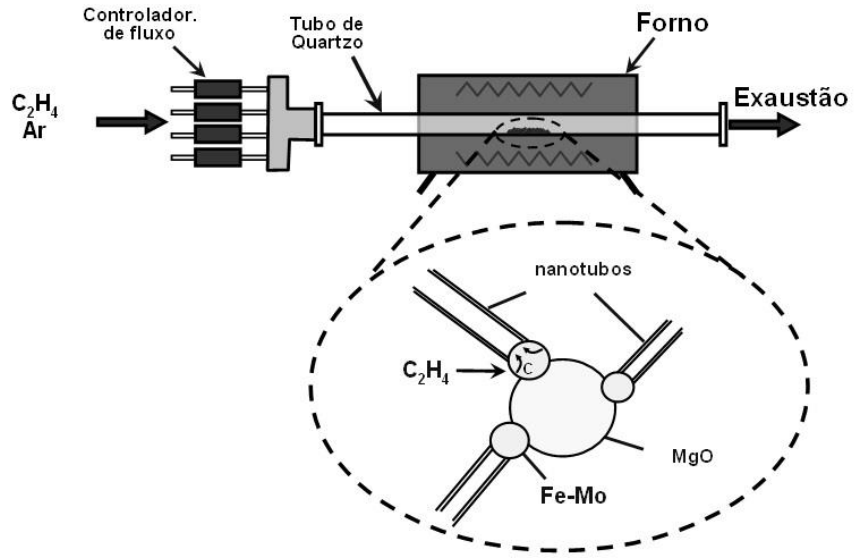
O processo de CVD para síntese de CNT funciona basicamente via a termodecomposição ou pirólise de hidrocarbonetos leves (metano, etileno, acetileno, etc.) como agentes precursores de carbono. Esta termodecomposição é feita sob atmosfera controlada utilizando, principalmente, gases inertes como agente de controle do ambiente de crescimento e carreamento dos subprodutos de reação.

O sistema CVD é constituído basicamente de um forno tubular com controladores de temperatura e de vazão dos gases envolvidos no processo, o qual está ilustrado esquematicamente na Figura 6.

Em geral, os processos de crescimento de CNT por CVD ocorrem à pressão atmosférica e a reação de síntese é catalisada com a utilização de metais de transição em forma de nanopartículas ancoradas em um suporte metal-óxido termicamente estável.

A função do catalisador é promover o progresso de catálise heterogênea, isto é, promover uma seletividade na reação de pirólise de modo que ela ocorra preferencialmente na superfície destas nanopartículas [11].

Figura 6 – Desenho esquemático do sistema de crescimento de nanotubos de carbono por CVD.



A partir do esquema apresentado na Figura 6, pode-se idealizar o seguinte mecanismo para a formação dos CNT:

1. O hidrocarboneto é adsorvido e dissociado na superfície metálica com formação de átomos de carbono adsorvidos;
2. Estes átomos de carbono podem dissolver-se e difundir-se através do metal, precipitando em regiões de crescimento preferencial, como as fronteiras de grão ou as interfaces entre o metal e o suporte. Desta forma, as partículas metálicas são destacadas da superfície e transportadas com os filamentos em crescimento, enquanto que a superfície ativa continua disponível para a reação, já que o carbono não se acumula sobre ela;
3. É também possível a nucleação na superfície, conduzindo à formação de filmes de carbono que efetivamente desativam o catalisador, o qual é denominado carbono encapsulante.

Para a síntese de CNT neste projeto, foram utilizados um sistema de CVD comercial e um construído no próprio laboratório. Tal sistema consiste de um tubo de quartzo posicionado dentro de um forno tubular com controle automatizado, via computador, da temperatura (até 1000°C) e do fluxo de gases dentro do reator (tubo de quartzo). Quatro linhas de gás independentes estão disponíveis e os gases utilizados são metano, etileno, hidrogênio, amônia e argônio. Este sistema é bastante versátil, simples e eficiente, permitindo a produção de amostras de ótima qualidade e com alta reprodutibilidade [11].

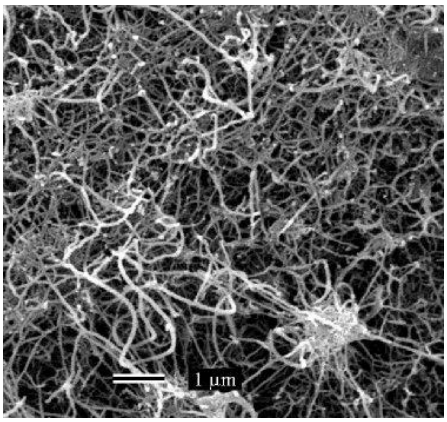
O processo de síntese de CNT estudado consiste dos seguintes passos [11]:

1. Aquecimento do catalisador em atmosfera de argônio até a temperatura desejada;
2. Injeção de gás etileno (C2H4) com fluxo inferior a 40 sccm por um tempo mínimo de 25 min;
3. Resfriamento em atmosfera de argônio.

É importante destacar que, do processo de síntese de CNT resulta uma mistura composta de catalisador com partículas metálicas, CNT e outras formas de carbono, como grafite e/ou carbono amorfo. Além disso, podem-se obter estruturas de CNT diferenciadas em SWNT e MWNT variando as condições de síntese, como temperatura, taxa de aquecimento e atmosfera. A Figura 7 abaixo mostra o sistema de deposição desenvolvido em laboratório [11].

Figura 7 – (a) Forno trizonal construído em nosso laboratório para produção de CNT por CVD. (b) MWNT produzidos por CVD utilizando etileno com fonte de gasosa.

(a)



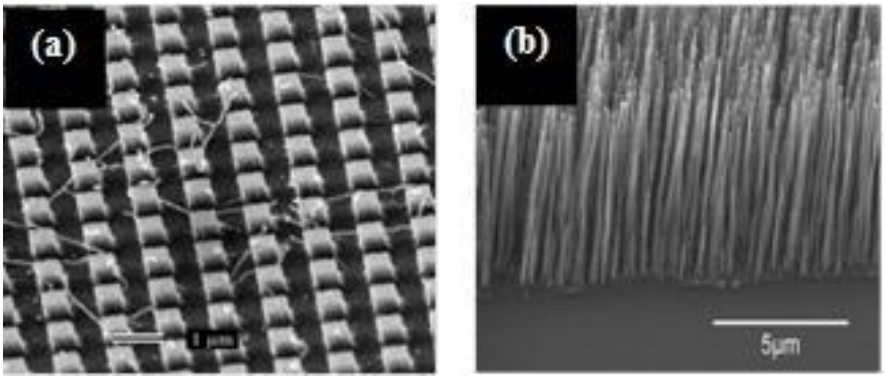
(b)

C. Crescimento controlado de CNT por CVD e por PECVD

Foi realizada também a produção de MWNT diretamente em substratos. Este tipo de deposição abre um enorme campo para o estudo e aplicações de CNT como emissores de elétrons e como eletrodos para células a combustível. Pode-se dizer que este método é o estado da arte no controle da posição e comprimento dos nanotubos sobre substratos.

Assim, o plano deste projeto foi desenvolver eletrodos para células a combustível usando esta técnica. A Figura 8 abaixo mostra dois exemplos de deposições que são realizadas em laboratório as quais nanotubos de carbono são produzidos nas orientações horizontais e verticais em relação ao substrato.

Figura 8 – Crescimento de CNT em substratos nas configurações horizontais (a) e verticais (b). (a) Micrografia eletrônica de varredura de CNT isolados suspensos entre postes de SiO2. (b) CNT alinhados sobre substratos de Si crescidos por PECVD.



Em ambos os casos, a técnica de crescimento utilizada é a CVD já descrita, na qual os metais catalisadores são depositados por técnicas de filmes finos como rf-sputtering e evaporação. A produção de nanotubos de carbono alinhados na vertical é realizada utilizando uma variação da técnica de CVD denominada CVD assistida por plasma (PECVD). A Figura 8 mostra o grau de controle de orientação dos nanotubos. Além disto, o Departamento de Física da UFMG possui um sistema de nanolitografia com feixe de elétrons tornando completamente viável a preparação localizada dos metais e o crescimento controlado dos nanotubos na direção vertical. Ao empregarmos a técnica de PECVD podendo alcançar um alto grau no controle do crescimento de MWNT, onde nanotubos isolados podem ser gerados em posições especificas do substrato. Esse tipo de deposição abre um enorme campo para o estudo e aplicações de nanotubos de carbono como emissores de elétrons e eletrodos. Pode-se dizer que este método é o estado da arte no controle da posição e comprimento dos nanotubos de carbono sobre substratos. A posição é determinada pelas ilhas dos metais catalisadores (por litografia por feixes de elétrons) e seu comprimento é determinado pelo tempo de deposição [2].

A técnica de DC-PECVD vem sendo empregada na preparação de MWNT alinhados na direção vertical. Esse método utiliza uma fonte de potência (DC) acoplada

a um dos eletrodos, enquanto o outro se encontra aterrado. Os gases utilizados como fonte de carbono são usualmente o metano ou acetileno, juntamente com hidrogênio ou amônia para eliminação de materiais como carbono amorfo. Os nanotubos são gerados na amostra localizada no catodo, onde ocorre a queda de voltagem (e geração do campo elétrico) necessária para o alinhamento vertical dos nanotubos. Nesse caso, pode-se usar Ni como catalisador e temperaturas de deposição em torno de 700 ºC. O filme de Ni é depositado através da técnica de rf-sputtering e sua espessura varia entre 2 - 10 nm dependendo do diâmetro do tubo desejado. A espessura do filme de Ni determina o diâmetro final do nanotubo. Assim, o substrato contendo o filme fino de metal é posto na câmara de deposição e aquecido até 700 ºC em uma atmosfera de amônia. Devido ao aquecimento, o filme fino se transforma em partículas de escala nanométrica (50-100 nm). Após atingir essa temperatura o gás acetileno é introduzido na câmara de deposição iniciando o crescimento (Figura 9 e Figura 10a). Em geral, pode-se controlar o tamanho das partículas (e consequentemente o tamanho dos nanotubos) através da espessura da camada de metal, pela temperatura final de aquecimento, ou pelo tempo de aquecimento. É importante ressaltar que essa técnica (como será descrito abaixo) é a que gera maior controle sobre a posição e comprimento dos nanotubos alinhados na direção vertical. Um exemplo dos nanotubos obtidos pode ser visto na Figura 10c [11].

Figura 9 – Modelo de crescimento por CVD ou PECVD de CNT utilizando filmes finos metálicos como catalisador.

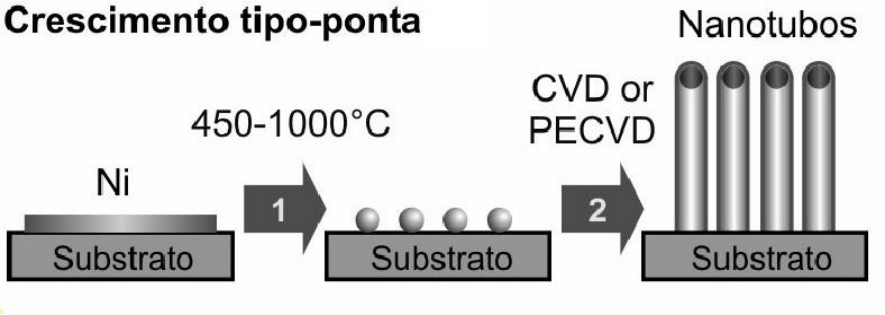
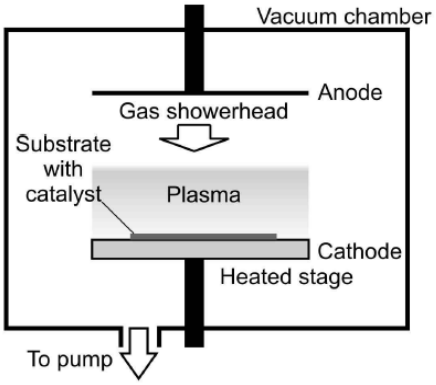
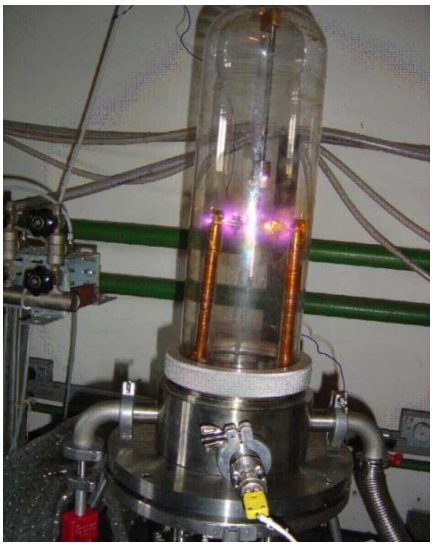


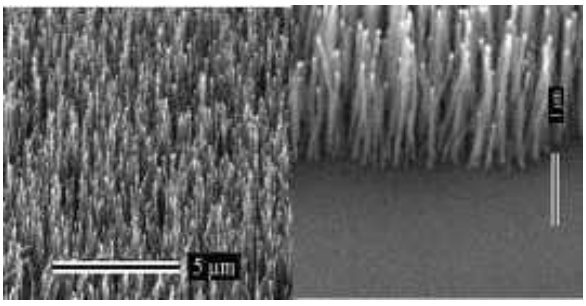
Figura 10 – a) Esquema da montagem do sistema DC-PECVD para crescimento de CNT b) Foto da montagem final do sistema. Nota-se o plasma ligado durante o crescimento dos nanotubos. c) CNT alinhados verticalmente crescidos por este método.



(a)



(b)



(c)

Tendo os sistemas todos prontos iniciou-se a preparação do substrato para crescimento que consiste na deposição do metal catalisador (níquel) na forma de filme fino.

Foi utilizado como substrato o silício dopado, onde seu óxido nativo foi removido com ácido fluorídrico, e em seguida uma nova camada de SiO2 foi depositada utilizando o sistema de rf-sputtering através do bombardeamento de um alvo sólido de SiO2. A barreira de óxido (SiO2) é necessária para evitar que o níquel difunda na superfície e forme um siliceto impedindo o crescimento efetivo dos nanotubos. Esta camada não deve ser muito grossa para manter a condutividade do substrato e evitar a polarização (e arcos) durante o crescimento, o que causa danos aos nanotubos.

Assim, foi estabelecida uma espessura ideal de 50nm, visto que para espessuras menores que esta a camada de SiO2 não evitou a difusão, e para espessuras maiores que 100nm houve a presença de arcos durante a deposição. Depois de feita a deposição da camada de SiO2, foram depositados sobre esta, através da evaporação de níquel, filmes finos de níquel, com diferentes espessuras de catalisador de Ni e Fe (2nm, 8nm, 17nm, 35nm). As espessuras foram controladas utilizando um controlador de espessura. O substrato composto é posto na câmara de deposição do PECVD e feito vácuo mecânico de 40 mTorr seguido de aquecimento até 600ºC em atmosfera de amônia (NH3) e, após atingir a temperatura, é simultaneamente aplicado a queda de tensão (que gera o plasma) e introduzido o gás acetileno (C2H2), e assim inicia-se o crescimento pelo tempo desejado[11].

Observou-se que quanto maior a espessura do filme de Ni, maior o diâmetro da nanopartícula e consequentemente maior o nanotubo. Os nanotubos crescidos no filme de 8nm se apresentaram melhores estruturados e, portanto, foi utilizada essa espessura para prosseguir com os demais estudos [12].

Outros parâmetros de operação (tensão aplicada e porcentagens de acetileno) foram variados separadamente e analisados através de diversos métodos e, em seguida, o Ni foi substituído por Fe como metal catalisador. O interesse em se utilizar ferro se deveu à possibilidade de realizar um estudo mais básico sobre o crescimento dos CNT e da fase da nanopartícula catalisadora. Para analisar tais efeitos foram realizadas medidas de espectroscopia Mössbauer e microscopia eletrônica de transmissão (MET) [12].

D. Obtenção de CNT crescidos com etileno em suporte de MgO

O óxido de magnésio também foi estudado como suporte para as nanopartículas dos metais catalisadores. O catalisador metálico pode ser introduzido no sistema de crescimento diretamente na fase de vapor (como ferrocenos), na forma de filmes finos de substratos, na forma de nanopartículas, ou embutido em uma matriz cerâmica porosa (como SiO2, Al2O3, MgO, etc). Esta última é a mais apropriada para produção em larga escala de CNT. A vantagem principal do MgO é que este pode ser removido facilmente através de soluções ácidas “fracas” diluídas, ao invés de soluções de ácido fluorídrico concentrado necessárias para remover Al2O3 e SiO2, os suportes mais comuns. Isso simplificaria enormemente os processos de purificação sem afetar a qualidade dos CNT gerados. Assim, foi estudado o cres-

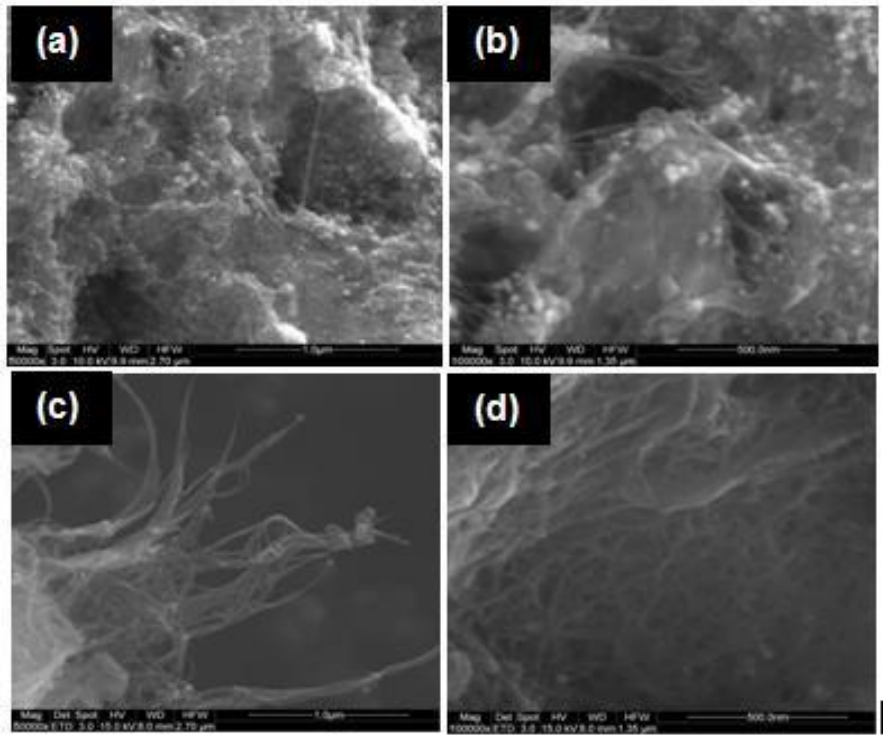
cimento de CNT obtidos com catalisador Fe:Mo em suporte de MgO para várias temperaturas, sendo que os valores acima de 700 °C apresentaram maiores quantidades de CNT[12].

E. Purificação de CNT de Paredes Simples e Múltipla

O procedimento para a purificação do SWNT é o seguinte: inicialmente 1000mg do material bruto é lavado em Tolueno para extrair Fulerenos. Depois, o material é aquecido a 390ºC por 50 minutos, em condições atmosféricas, para remover os carbonos amorfos. Então, a amostra é colocada no ultrassom por 1 hora em solução 6M de ácido clorídrico e, então é mantida nesta solução por 24 horas, para eliminar os resíduos metálicos. Finalmente, o material remanescente é filtrado com membrana de Teflon de 1μm (Milipore) e então seco a 100 ºC por 24 horas. Este procedimento é repetido, como mencionado, por três vezes para uma purificação completa.

A caracterização dos CNT incluem microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET), análises termogravimétricas (TG) e espectroscopia Raman. Apenas de forma ilustrativa será apresentado o resultado para MEV na Figura 11, onde pode-se verificar a eficiência na purificação do CNT[13].

Figura 11 – Imagens de MEV para SWNT antes (a-b) e depois (c-d) da purificação.



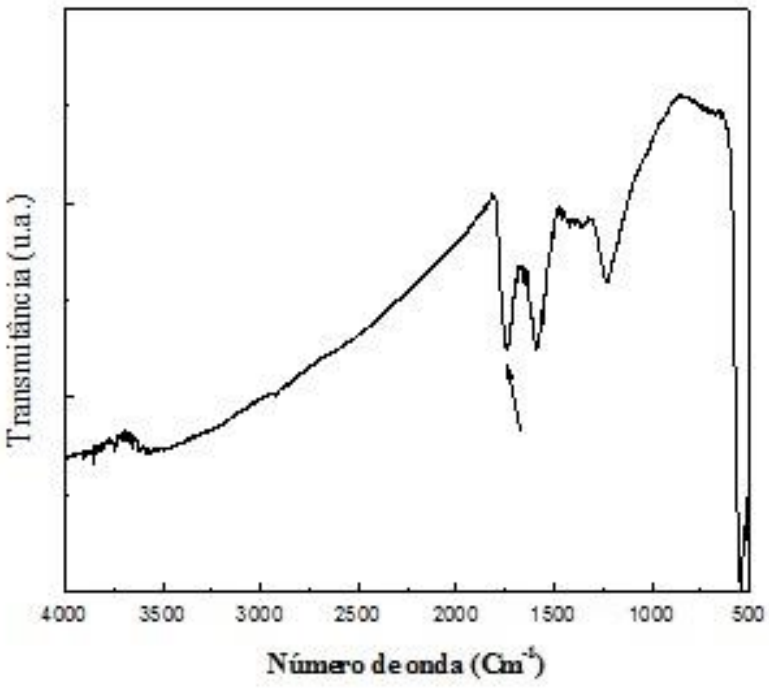
F. Funcionalização Química e Dispersão de CNT de Paredes Simples e Múltipla

Como os CNT sintetizados e purificados não são solúveis e não permanecem dispersos em água, foram feitos vários testes com reagentes diferenciados. Essas funcionalizações se apresentam de duas formas: com interações não covalentes, que possibilitam a obtenção de tubos isolados sem modificar extensamente sua propriedade eletrônica e com interações covalentes que possibilitam a obtenção de tubos isolados com especificidades químicas. A funcionalização de CNT agrega a eles importantes características, devido a diferenciações de suas propriedades químicas e facilidade de sua manipulação [13].

A carboxilação é uma das funcionalizações mais estudadas, pois inclui a carboxila, que é um grupo funcional muito importante como indutor de outras funcionalizações. Além disso, é útil para tornar os CNT solúveis em água [13].

Após a funcionalização, foram realizadas análises de espectroscopia na região do infravermelho que confirmaram a presença de grupos COOH ligados aos nanotubos (Figura 12). Sabe-se que os grupos carboxila se ligam às regiões mais reativas dos CNT, as quais estão localizadas nas extremidades do tubo e/ou em defeitos estruturais de suas paredes [13].

Figura 12 – Espectro IR de CNT carboxilado (a seta indica o pico característico da vibração –OH do grupo –COOH em ~1740 cm-1).



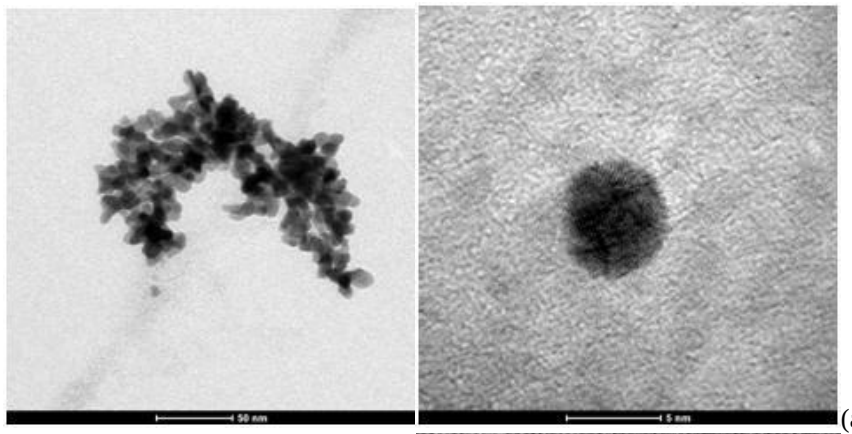
A carboxilação teve êxito, de forma que se pode concluir que se tem um método de funcionalização confiável. Em média 3% dos carbonos existentes na estrutura do CNT estão com uma molécula de COOH ligada. Esta quantidade de moléculas ligadas é suficiente para deixá-lo em suspensão aquosa por tempo indeterminado [13].

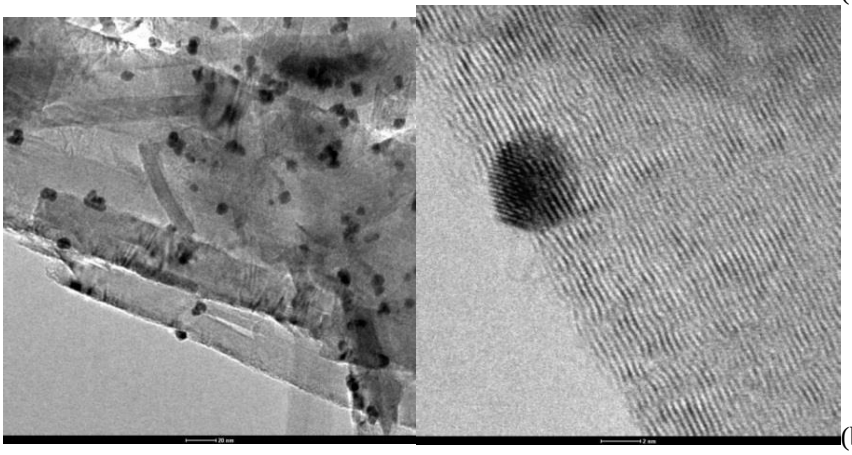
G. Preparação das Nanopartículas Catalisadoras de Platina e Ouro

Foram preparadas nanopartículas de ouro e platina pelo método de transferência de fase e por redução química em fase aquosa. Estas partículas atuam como catalisador para a quebra de hidrogênio e oxigênio nas células a combustível.

As micrografias por MET abaixo (Figura 13) apresentam os resultados obtidos [14]. As nanopartículas fabricadas com platina possuem diâmetro em torno de 5 nm. Já as nanoparticulas fabricadas com ouro possuem diâmetro em torno de 5-10 nm, e neste caso, as nanopartículas já se encontram ancoradas na superfície dos nanotubos de carbono.

Figura 13 – Micrografias por MET das nanopartículas com Platina (a) e com ouro (b).

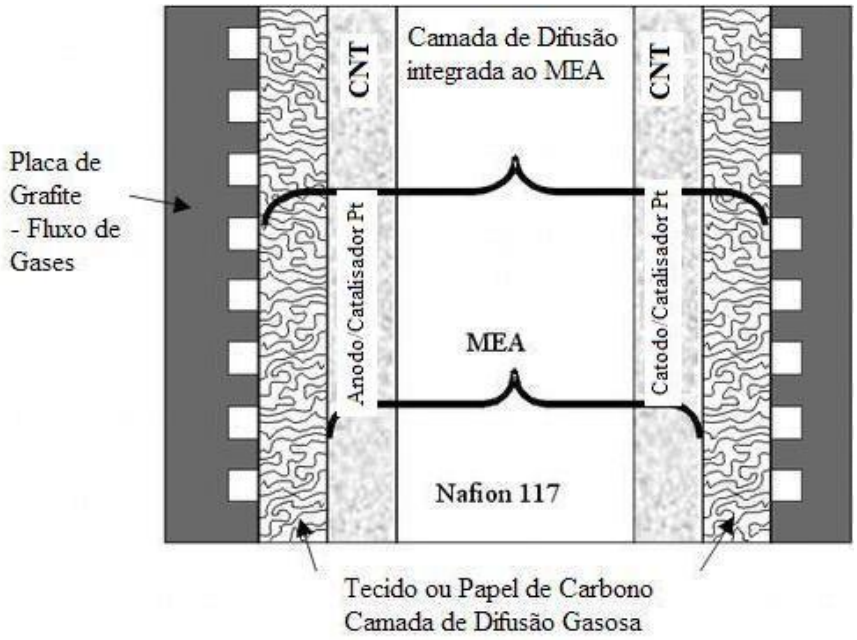

(a)


(b)

H. Crescimento de CNT pelo Método de CVD em Panos de Carbono

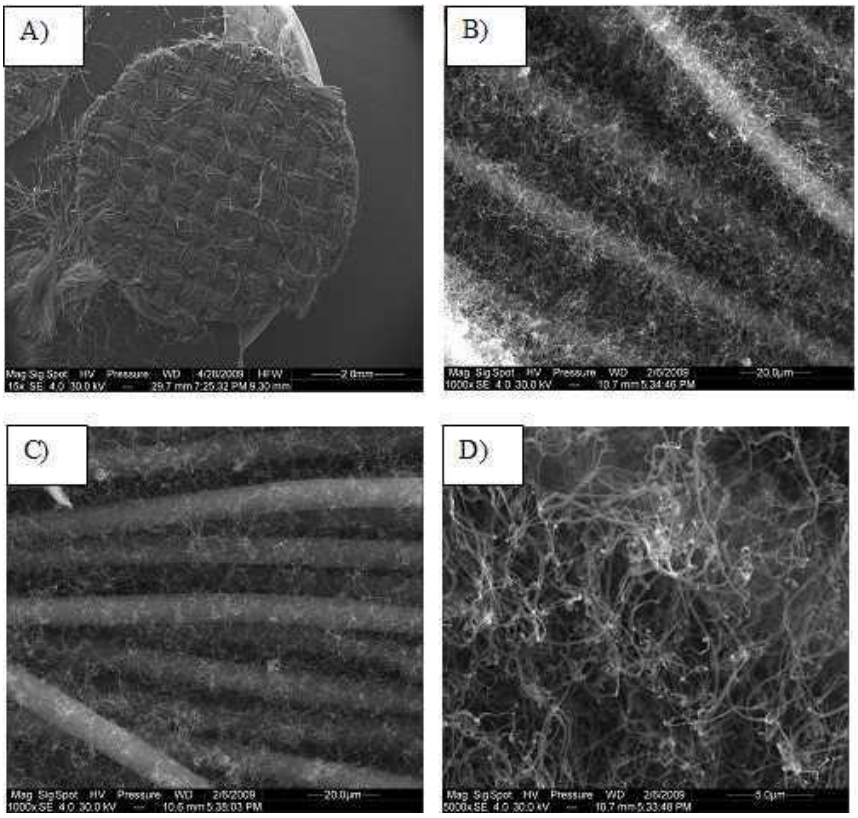
Uma vez produzido o nanotubo com a funcionalidade desejada para a aplicação em células a combustível, o próximo passo é trabalhar na construção do MEA (Membrane Eletrolyte Assembly), conforme indica a Figura 14.

Figura 14 – Indicação do CNT na configuração da célula a combustível.



O método CVD permite fazer o crescimento de CNT em diversas superfícies com diferentes tamanhos. Abaixo, a Figura 15 apresenta imagens de MEV em tecido de fibra de carbono da EletroChem, Inc. Tipo: EC-CCC-060. A Figura 15b e a Figura 15c demonstram o sucesso do crescimento de nanotubos de carbono em cima do pano. Nota-se em ambos os casos uma ótima cobertura dos CNT ao longo da fibra. A Figura 15d mostra em maiores detalhes a morfologia dos nanotubos crescidos. Estes resultados demonstram o aumento de área superficial que será causado pelos nanotubos de carbono em relação ao pano puro [15].

Figura 15 – Imagens de MEV mostrando o crescimento dos CNT em cima de fibras de carbono por CVD.



I. Crescimento de CNT por PECVD

Fibras de carbono cobertas com Teflon (PTFE) foram utilizadas como substrato para o crescimento de nanotubos de carbono verticalmente alinhados através do processo PECVD, usando Níquel como partículas catalisadoras. A Figura 16 traz um esquema que sintetiza todo processo de crescimento em cada uma das etapas descritas acima: preparação da amostra, pré-tratamento e crescimento [15]. A Figura 17 abaixo mostra uma foto da câmara durante o processo de crescimento em que pode-se observar a amostra sobre o substrato já aquecido e sob plasma de amônia.

Figura 16 – Diagrama representando as etapas do crescimento de nanotubos de carbono verticalmente alinhados via PECVD.

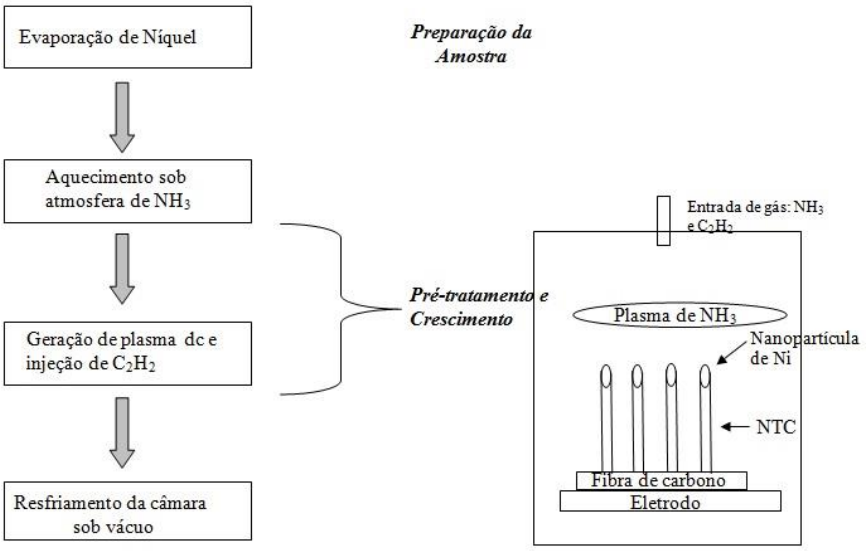
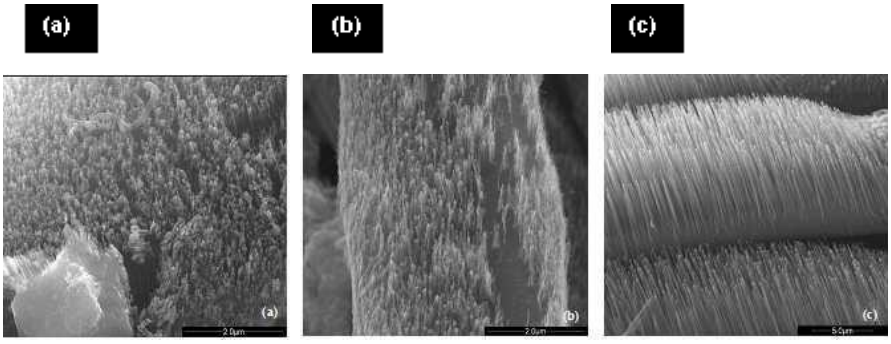


Figura 17 – Foto do processo de crescimento de CNT verticalmente alinhados.

A otimização do processo de crescimento é resultante do ajuste de vários parâmetros de crescimento, como a razão de fluxo entre C2H2 e NH3, espessura do catalisador Ni sobre as fibras de carbono, bem como temperatura e tempo de crescimento. Imagens obtidas por MEV permitiram analisar os nanotubos crescimentos sobre fibras de carbono buscando a otimização do processo [15].

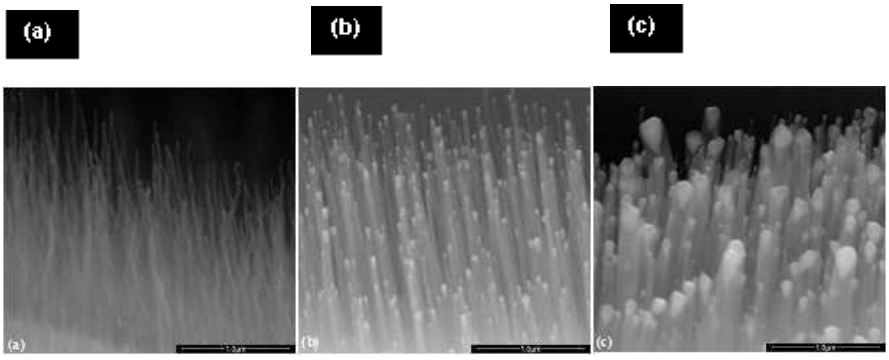
Para um tempo de 40 min, Figura 18, os resultados mostram uma condição otimizada de crescimento quando comparadas aos tempos de 20 e 30 minutos, em que pode ser visto uma floresta de nanotubos de carbono verticalmente alinhados sobre fibras de carbono. Nestas condições de crescimento, nanotubos chegam a um comprimento de até 3 μm.

Figura 18 – Imagens de CNT verticalmente alinhados para diferentes tempos de crescimento: (a) 20min, (b) 30min e (c) 40min.



Como a camada catalisadora tem importante influência no crescimento, permitindo o controle do diâmetro dos nanotubos com diferentes espessuras de Ni sobre as fibras de carbono, foram utilizadas, três valores de espessura: 8, 15 e 30 nm. A Figura 19 mostra as imagens para estes nanotubos, em que pode ser observada a dependência da espessura da camada de Ni com o diâmetro do nanotubo [9].

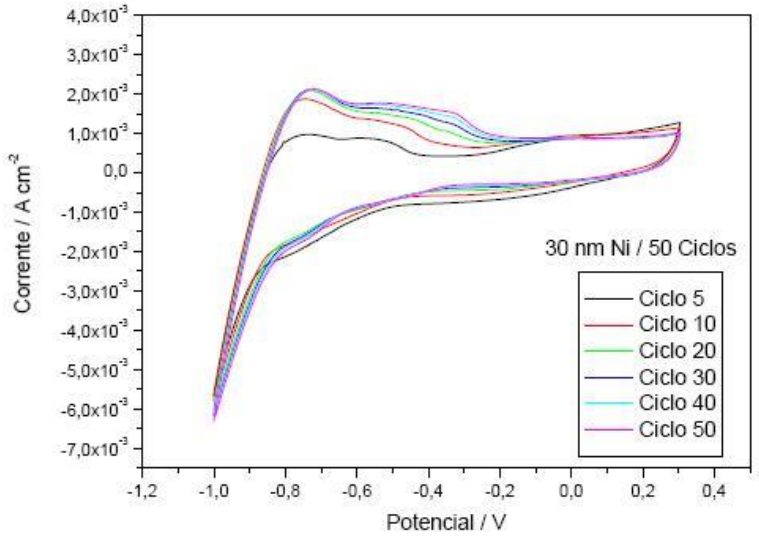
Figura 19 – Imagens de CNT verticalmente alinhados para diferentes espessuras de Ni: (a) 8nm, (b) 15nm e (c) 30nm.



J. Deposição de Platina por Voltametria Cíclica

Para deposição de platina (Pt) via eletroquímica, foi utilizada a Voltametria Cíclica (VC) sobre eletrodos de nanotubos de carbono alinhados (CNTA) com diferentes espessuras de depósito de Níquel (catalisador usado no crescimento dos CNTA sobre tecido de carbono). Na VC, usamos 25 e 50 ciclos para depósito de Pt. A VC é vantajosa do ponto de vista que permite seguir o crescimento das partículas de platina em função dos ciclos. Também é útil para determinar o valor do potencial de redução do íon platina. A partir destes ensaios seria possível estudar o crescimento a través da técnica de pulso de potencial, que seria mais apropriada para um maior volume de amostras, devido a que requer menos tempo para deposição da platina [16]. Na Figura 20 é apresentado um resultado de uma das amostras executadas.

Figura 20 – Voltametria cíclica de uma amostra de CNT.



Para determinar o grau de eficiência e as diferenças na deposição, as amostras foram analisadas por MEV e Microssonda (EDS), que dá uma composição qualitativa da superfície da amostra. Nos nanotubos que têm um diâmetro médio menor, a platina ao ser depositada cobre uma maior área superficial, dando um aspecto de um vale nevado. Com 30 nm de Níquel, a platina já depositou em forma mais homogênea, dando para ver claramente os nanotubos com as partículas de platina na superfície destes. Os gráficos EDS mostraram que existe, além de platina e carbono, resíduos de níquel, o que indica que não todo o níquel é encapsulado no processo de crescimento dos nanotubos [16]. A técnica de Voltametria cíclica é vantajosa, pois permite seguir o crescimento das partículas de platina em função dos ciclos. Também é útil para determinar o valor do potencial de redução do íon platina. A partir destes ensaios é possível estudar o crescimento através da técnica de pulso de potencial, que seria mais apropriada para um maior volume de amostras, devido a que requer menos tempo para deposição da platina.

K. Caracterização Eletroquímica dos Eletrodos de CNT Puros

Foram caracterizadas as seguintes amostras [17]:

- Amostra de tecido de carbono (como recebido) e amostras de tecido de carbono com diferentes espessuras de depósito de Níquel (prévio ao crescimento de CNT alinhados);
- Amostra de tecido de carbono com depósito de Níquel (8 nm de espessura) tratado termicamente.

Os resultados dos testes realizados apontam que, de certa maneira, o níquel tratado termicamente tem um papel de catalisador de reações redox.

A seguir ocorreu a caracterização por VC e MEV para amostras de tecido de carbono com deposição de nanotubos de carbono alinhados (CNTA). Utilizamos como material base o tecido de carbono recoberto de teflon sobre o qual foram depositadas diferentes espessuras de catalisador metálico (níquel) pela técnica de sputtering. Tecidos com espessuras de deposição de níquel de 8, 14, e 30 nm serviram como suporte para deposição de CNTA pela técnica de PECVD [17].

- Amostra de CNT alinhados depositados sobre tecido de carbono e Níquel com superfície de 8 nm;
- Amostras de CNT crescidas em tecidos de carbono com depósitos de níquel de diferentes espessuras.

A partir dos resultados desses testes, observou-se que a amostra apresentou pouca variação na área interna, o que indicaria uma boa estabilidade do eletrodo no tempo. O segundo teste mostrou um comportamento similar para diferentes espessuras de níquel a partir de 14 nm. Já uma espessura de 8 nm apresentou uma área interna bastante menor, o que poderia indicar que os nanotubos depositados neste substrato não possuem as mesmas características dos nanotubos depositados em substratos com maior quantidade de níquel [17].

L. Caracterização Eletroquímica dos Eletrodos de CNT com Nanopartículas Catalisadoras

Foram feitos os seguintes testes [17]:

- Determinação da área efetiva das amostras por espectroscopia de impedância: Segundo os resultados obtidos para seis amostras de CNT não platinizados, a área efetiva é aproximadamente 10 vezes a área geométrica das amostras. Como dito anteriormente, estes resultados são preliminares, pois ainda falta testar amostras platinizadas e ainda testar mais amostras de CNT não platinizados, para efeitos estatísticos [17].
- Voltametria cíclica para amostra de tecido de carbono nanoplatinizada: O eletrodo de CNTA platinizado mostrou-se bastante estável após 7000 ciclos, o que equivale a aproximadamente 100 horas de uso contínuo [17].
- Platinização de amostras de tecido de carbono tecido de carbono com carvão Black e Nafion e amostras de tecido de carbono com nanotubos de carbono: A

modo de comparação tentou-se platinizar uma amostra de tecido de carbono e outra amostra de tecido de carbono, na qual foi depositada uma mistura de carvão Black e uma solução de Nafion. Após 50 ciclos de platinização, observou-se na que não houve deposição de platina na amostra de tecido de carbono. Já na outra amostra, observou-se que a deposição de platina foi homogênea na superfície de carvão Black, apesar de o carvão Black não estar homogeneamente depositado no tecido de carbono [18].

M. Testes de Desempenho da Célula Unitária de Membrana com Eletrodos Baseados em CNT [18]-[19]

Este tópico investiga a influência da substituição do suporte carbonáceo de grafite por CNT em eletrodos de células a combustível tipo PEM. Existem diferentes técnicas para a fabricação dos eletrodos de células PEM. Durante o projeto foram realizadas diversas maneiras de depositar os nanotubos de carbono em cima dos eletrodos.

No final, a maneira mais eficiente foi utilizar uma pintura da camada catalítica sobre a GDL, usando-se pintura manual. Esta técnica é eficiente para estudos básicos em células unitárias de pequenas dimensões. As caracterizações dos eletrodos foram feitas em parceria com pesquisadores do IPEN em São Paulo. Isso foi importante, pois permitiu comparar o desempenho dos eletrodos com nanotubos de carbono com um eletrodo padrão utilizado nas células a combustível.

Iniciou-se um estudo sistemático comparando o material da camada catalítica comercial E-Tek com camadas catalíticas preparadas com os CNT fornecidos pela UFMG e com grafite Vulcan (GV) impregnados com platina. Os eletrodos E-tek consistem de GV e de nanopartículas de Pt com propriedades otimizadas e são a referência comercial de células tipo PEM, fornecendo os resultados estado da arte para estes dispositivos. Desta forma, pode-se avaliar a influência do método de impregnação de platina e do suporte carbonáceo (CNT ou GV) com platina depositada pela mesma técnica.

Foram impregnadas nanopartículas de Pt na superfície do CNT recebido e, para comparação, no grafite Vulcan (GV). A impregnação foi feita por via química, usando ácido cloro-platínico, seguida de tratamento térmico de redução (300 °C sob H2). A partir da impregnação da Pt na superfície das fases carbonáceas, foram preparadas tintas à base de etanol dos sistemas CNT-Pt e GV-Pt. Estas tintas foram usadas para a deposição da camada catalítica sobre a camada de difusão gasosa, que juntas formam os eletrodos das células PEM. Os conjuntos membrana-eletrodo (MEA) foram preparados por prensagem a quente de eletrólitos Nafion (115) e das camadas do EDG, em condições determinadas de temperatura, tempo e carga.

Foram preparadas cerca de quinze amostras (células), identificadas por Sx, onde x identificada o número da amostra correspondente a uma determinada configuração de eletrodos. Por exemplo, as amostras S1 e S2 correspondem a células unitárias PEM com a seguinte configuração:

- (S1) GV-Pt / Nafion / E-tek;

- (S2) CNT-Pt / Nafion / E-tek.

A amostra S1 tem o mesmo suporte de carbono (GV e E-tek) nos eletrodos e compara a Pt depositada pela técnica de impregnação usada para a adição de Pt no CNT com a Pt otimizada do eletrodo comercial E-tek . A amostra S2 compara os CNT-Pt com os eletrodos referência E-tek. Desta forma, pode-se avaliar o efeito do suporte de carbono e do método de impregnação de Pt. Os resultados para estas amostras encontram-se nas Figuras 21-22. Para cada amostra foram feitas pelo menos quatro medidas de células PEM a 80 °C, com gases H2 e O2 umidificados, colocando os eletrodos preparados (CNT-Pt e GV-Pt) como anodo e como catodo sequencialmente. Este procedimento visa determinar sistematicamente a influência dos parâmetros em ambos os eletrodos.

Figura 21 – Curvas de polarização amostras GV-Etek.

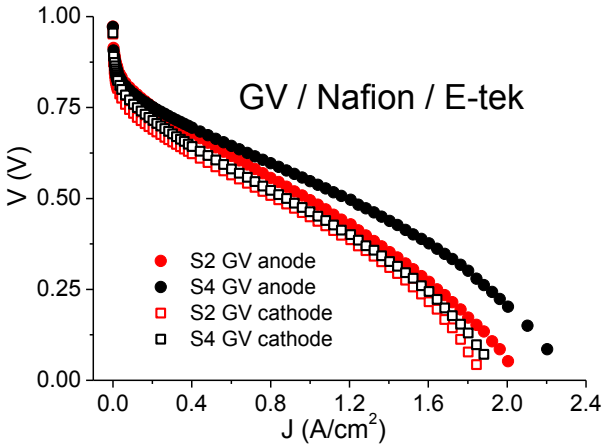
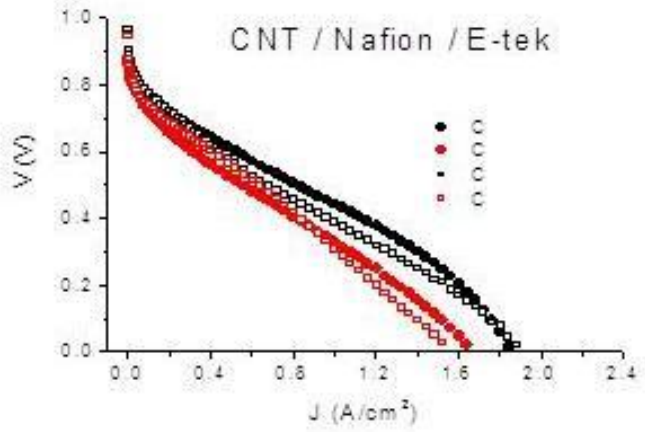


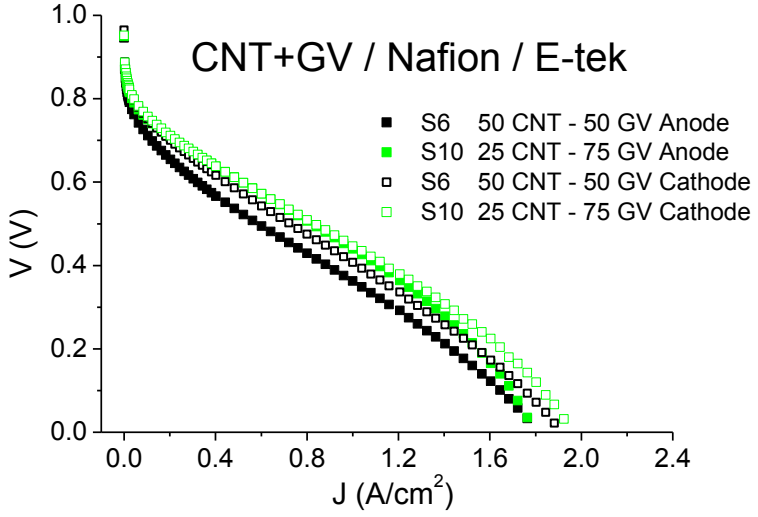
Figura 22 – Curvas de polarização amostras CNT-Etek.



A principal observação nestas medidas é que as amostras com CNT nos eletrodos têm desempenho global inferior em relação às amostras com GV. Entretanto, em baixas correntes, as amostras com CNT no catodo exibem melhores desempenhos. É interessante notar que as amostras GV-Pt / Nafion / E-tek tem o comportamento oposto, ou seja, quando o eletrodo otimizado comercial (E-tek) é posicionado no catodo (GV-Pt no anodo) o desempenho da célula é superior do que na posição inversa. Este é um resultado esperado uma vez que as reações de catodo (redução de oxigênio) que ocorrem nas PEMFC são as mais lentas e responsáveis pelas maiores perdas nestes dispositivos. Portanto, quando o eletrodo comercial é o catodo a célula com GV-Pt no anodo tem melhor desempenho. No caso dos CNT esse efeito não é observado e, ao contrário, as células têm melhor desempenho quando o eletrodo CNT-Pt é o catodo. Este resultado sugere que os CNT contribuem para a reação de redução do oxigênio, mas para se determinar precisamente que tipo de efeito os CNT promovem no catodo de células são necessários estudos mais detalhados.

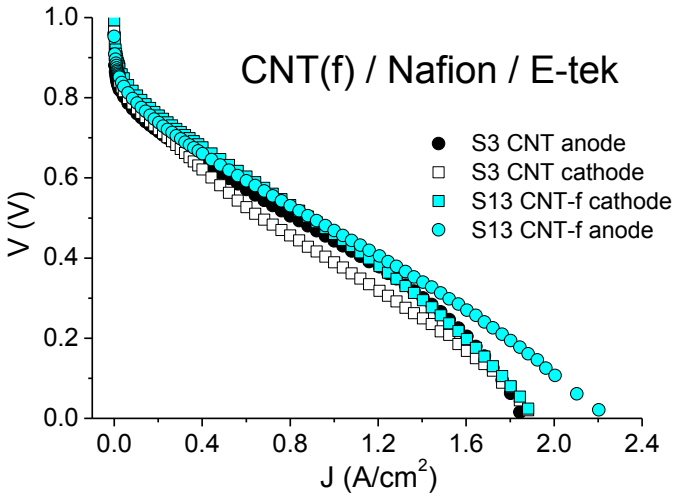
Também foi preparada uma série de células eletrodo contendo uma mistura de GV e CNT. Foram preparados eletrodos com substituição do GV por CNT, como, por exemplo, a amostra (S6) que corresponde a 50%CNT-Pt + 50%GV-Pt / Nafion / E-Tek. Todas as amostras foram medidas duas vezes invertendo-se o lado dos eletrodos, ou seja, ora o eletrodo referência E-tek foi anodo e os eletrodos com CNT+GV foram catodo, e vice-versa. Os resultados mostrados na Figura 23 mostram que as amostras têm desempenho similar às amostras de CNT, e o mesmo efeito em de melhora das reações catódicas em baixas correntes foi reproduzido nesta série de amostras.

Figura 23 – Curvas de polarização amostras X%CNT-Pt+(100-X)%GV-Pt / Nafion / E-Tek.



No processo de investigação das células foi constatada certa dificuldade para se dispersar os CNTs em etanol para a preparação das tintas à base de CNt-Pt. As tintas contendo CNT-Pt resultam em camadas mais rugosas e com menor homogeneidade devido à maior dificuldade de dispersão dos CNTs em etanol. Para tentar melhorar a dispersão dos CNT em etanol foram fornecidos pela UFMG CNT funcionalizados (CNT-f). Estes CNT-f têm sua superfície modificada quimicamente, permitindo uma melhor dispersão no meio alcoólico das tintas catalíticas para pintura dos eletrodos. Com esses CNT-f foram preparadas amostras CNT-f / Nafion / E-tek e os resultados obtidos são mostrados na Figura 24. De fato, estes foram os melhores resultados obtidos com CNT e novamente, o efeito dos CNT nas reações catódicas foi observado na região de baixas correntes.

Figura 24 – Curvas de polarização amostras CNT-Etek e CNT-f.



Os resultados mostram os principais pontos:

- CNT no anodo: aparentemente, há um efeito ôhmico. A queda de desempenho com o uso de CNT no anodo, em comparação com GV, pode ser relacionada com um efeito de condutividade do suporte de carbono.
- CNT no catodo: diferentemente do resultado (esperado) do GV, no qual há uma queda acentuada de desempenho (especialmente em baixas densidades de corrente) quando o GV passa de anodo para catodo, os CNT não apresentam uma grande diferença quando são usados como catodo. Os resultados são preliminares, mas sugerem efeito positivo do CNT na reação de redução do oxigênio (maior causadora de sobrepotenciais na PEM).

Em ambos os casos os resultados são promissores. Ou seja, com um processamento simples obteve-se um desempenho pouco inferior com os CNT nos anodos, e como catodos há um ganho mensurável em baixas densidades de corrente, sugerindo efeito catalítico.

7.4 Conclusões

As experiências realizadas mostraram os principais pontos:

- Os eletrodos de CNT recobertos com nanopartículas de Pt obtidos neste projeto apresentaram as características desejáveis para serem aplicados em células a combustível do tipo PEM;
- Os eletrodos recobertos com nanopartículas de ouro tornaram possível a redução de custos de produção. A membrana CNT/Pt mostrou desempenho superior às membranas poliméricas de Nafion®;
- CNT no anodo: queda de desempenho com o uso de CNT no anodo pode ser relacionada com um efeito de condutividade do suporte de carbono;
- CNT no catodo: sugerem efeito positivo do CNT na reação de redução do oxigênio.

Os resultados são promissores, ou seja, por meio de um processamento simples de impregnação de platina obteve-se um desempenho pouco inferior com os CNT nos anodos. Como catodo há um ganho mensurável em baixas densidades de corrente, sugerindo efeito catalítico. O uso de nanotubos funcionalizados resultou em melhor desempenho das células, indicando que desenvolvimentos no processamento dos eletrodos podem resultar em eletrodos mais adequados para os CNT. Uma sugestão para projetos futuros, visando aprimorar os eletrodos à base de CNT, é o uso de técnicas mais elaboradas para a impregnação da platina nos CNT. Estes desenvolvimentos deverão promover condições mais adequadas para que os potenciais efeitos positivos do uso de CNTs sejam mais evidentes e traduzidos em ganhos de desempenho do dispositivo.

Além disso, foi possível vivenciar toda a complexidade teórica e instrumental do objeto de desenvolvimento do projeto de maneira a se perceber que dificilmente se conseguirá desenvolver a tecnologia sem a presença da indústria, com elevado aporte financeiro e com equipe altamente qualificada e capacitada, e também que a realidade comercial das tecnologias do hidrogênio encontram-se em médio e longo prazos.

Capítulo 8

Capítulo 8: Desenvolvimento de Membrana Polimérica para Células a Combustível[8]

***Resumo* – As tecnologias do hidrogênio para a produção de energia se mostram promissoras para o futuro pelos seus benefícios ambientais e energéticos. Entretanto tais tecnologias possuem gargalos que impedem a sua aplicação imediata em larga escala. Dentre as barreiras para as células a combustível, a membrana polimérica se apresenta como uma questão em aberto. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma membrana polimérica desenvolvida de maneira original, visando aprofundar os conhecimentos em células a combustíveis e buscando superar os problemas para a sua popularização. Os resultados do projeto indicam a obtenção de uma membrana polimérica com potencial para ser utilizada como membrana de troca iônica em uma célula a combustível. Mais que o desenvolvimento de um novo material, o projeto permitiu conhecer de perto e a fundo a tecnologia de células a combustível e as tendências de desenvolvimento futuro.**

8.1 Introdução

Nas duas últimas décadas, cada vez mais a nossa sociedade tem se convencido de que a tendência atual é a transformação da economia mundial em uma economia baseada em energias renováveis. O interesse no aumento do uso de fontes renováveis não é apenas acadêmico como também de instituições governamentais e empresariais, visto que a ampla disponibilidade de fontes surge como alternativa às limitadas reservas de combustíveis fósseis. A transição para um mundo sustentável torna-se, então, o desafio do século [1].

Um dos problemas da sociedade moderna encontra-se associado à presença de carbono nas fontes energéticas, resultando em emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, verificando-se ao longo da história o uso energético, percebe-se um comportamento de descarbonização da fonte. De lenha, cuja cadeia carbônica é extensa, passando por carvão e petróleo, com cadeias carbônicas menores e decrescentes, e chegando-se ao gás natural, que por sua vez possui apenas um átomo de carbono e quatro de hidrogênio. Dessa forma é natural se pensar que o energético futuro seja um energético sem carbono e apenas com hidrogênio. Essa é a ideia da economia do hidrogênio, onde todas as fontes estariam associadas com a produção e uso do hidrogênio.

O grande problema é que o hidrogênio não é uma fonte e sim um vetor, um transportador de energia, que carrega parcialmente a energia da fonte primária que lhe deu origem. Isto implica em problemas de produção, transporte e armazenamento,

[8] SILVA, C. H. F. da; MADUREIRA, A. J. V.; PRATES, C.F.; SOUZA, J. C.; SOUZA, C. H. F. B.; SILVA, M. E. S. R.; SOUSA, R. G.; FREITAS, R. F. S.;. Publicado no VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

com impactos na viabilidade técnica e econômica dessa rota de utilização energética.

Na economia do hidrogênio a produção de eletricidade, ou eletricidade e calor (cogeração), é feita basicamente nas células a combustível. Este equipamento realiza uma reação eletroquímica do hidrogênio com o oxigênio, produzindo um fluxo de elétrons (energia elétrica) e tendo como produto somente o vapor de água.

As células a combustível tem sido desenvolvidas desde a sua descoberta em 1839 por William Grove. Na década de 1960, a célula a combustível do tipo alcalina (AFC) foi responsável pelo suprimento de energia que possibilitou à viagem do homem a lua. Nessa época também foi desenvolvimento a configuração conhecida hoje como PEM (*Proton Exchange Membrane ou Polimeric Exchange Membrane*). As células AFC e PEM possuem como maiores problemas: exigência de hidrogênio puro e severa restrição a presença de monóxido de carbono.

Para o caso da membrana polimérica das células PEM, as principais questões são: o custo, necessidade de umidificação da membrana, limitação da temperatura de operação do conjunto abaixo de 90ºC e fornecimento de gases reagentes sob pressão. Além disso, a baixa temperatura de operação torna o catalisador metálico susceptível ao envenenamento e desativação por monóxido de carbono, impondo a necessidade de emprego de gases reagentes puros e o emprego de ligas metálicas caras como catalisadores. Um grande desafio, então, é produzir células que possam ser adequadamente operadas em temperaturas mais elevadas sem a necessidade de um rigoroso controle de umidade [2].

O Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico – P&D Cemig/Aneel GT 232 (Código Aneel: PD-4951-0232/2007) [3] teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma membrana polimérica adequada para aplicação em células PEM, que se configurasse numa opção as membranas comerciais. A metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto foi a experimentação, baseada e direcionada no levantamento do estado da arte da tecnologia. O resultado obtido foi uma membrana trocadoras de prótons baseadas em poli(arileno éter sulfona)s sulfonadas reticuladas, com potencial para ser utilizada em células a combustível. Outras aplicações para o polímero devem ser alvo de pesquisas específicas. Por se tratar de uma pesquisa básica, as questões associadas com estudo econômico não serão tratadas nesse estudo.

O grande benefício desse projeto para a concessionária de energia foi o conhecimento obtido e o subsídio para posicionamento estratégico no assunto e também no acompanhamento da tecnologia.

O projeto foi concluído em 2011 e sendo realizado dentro da parceira da Cemig GT com o Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais.

8.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Células a Combustível

Uma célula a combustível é um dispositivo onde ocorre uma reação eletroquímica entre o oxigênio e gases ricos em hidrogênio ou hidrogênio puro produzindo eletricidade, calor e água como produtos da reação [3].

As células a combustível podem ser classificadas de diversas formas, levando-se em consideração parâmetros como tipo de eletrólito, temperatura de operação ou tipo de compostos de alimentação, sendo a classificação mais comum a que considera o tipo de eletrólito, conforme apresenta a tabela 1:

Tabela 1 – Tipos de Células a Combustível.

Tipo	Eletrólito	Temperatura
Polímero Condutor Iônico – PEMFC	Membrana polimérica	60 a 80 ºC
Alcalinas – AFC	Hidróxido de potássio em meio aquoso	80 a 200 ºC
Ácido Fosfórico – PAFC	Ácido fosfórico	200 ºC
Carbonato Fundido – MCFC	Carbonato de sódio ou de magnésio	650 ºC
Óxido Sólido – SOFC	Compostos cerâmicos de cálcio ou de zircônia	1000 ºC

Cada um desses tipos apresenta, obviamente, vantagens e desvantagens. No que tange às células a base de eletrólito polimérico, algumas vantagens são: a flexibilidade de operação, a aplicação veicular.

Dentre as limitações, para amplo uso das células à base de eletrólito polimérico, destacam-se aquelas decorrentes de fatores dependentes das características dos materiais. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos eletrólitos poliméricos a partir de materiais mais baratos e com melhores propriedades eletroquímicas se tornou uma das áreas de maior relevância para pesquisas visando à consolidação da tecnologia comercial de células a combustível [3].

As Figuras 1-2 apresentam os grandes motivadores para a pesquisa em células a combustível por parte das empresas de energia elétrica no mundo e no Brasil.

Figura 1 – Eficiência x Potência em equipamentos de produção de energia [4].

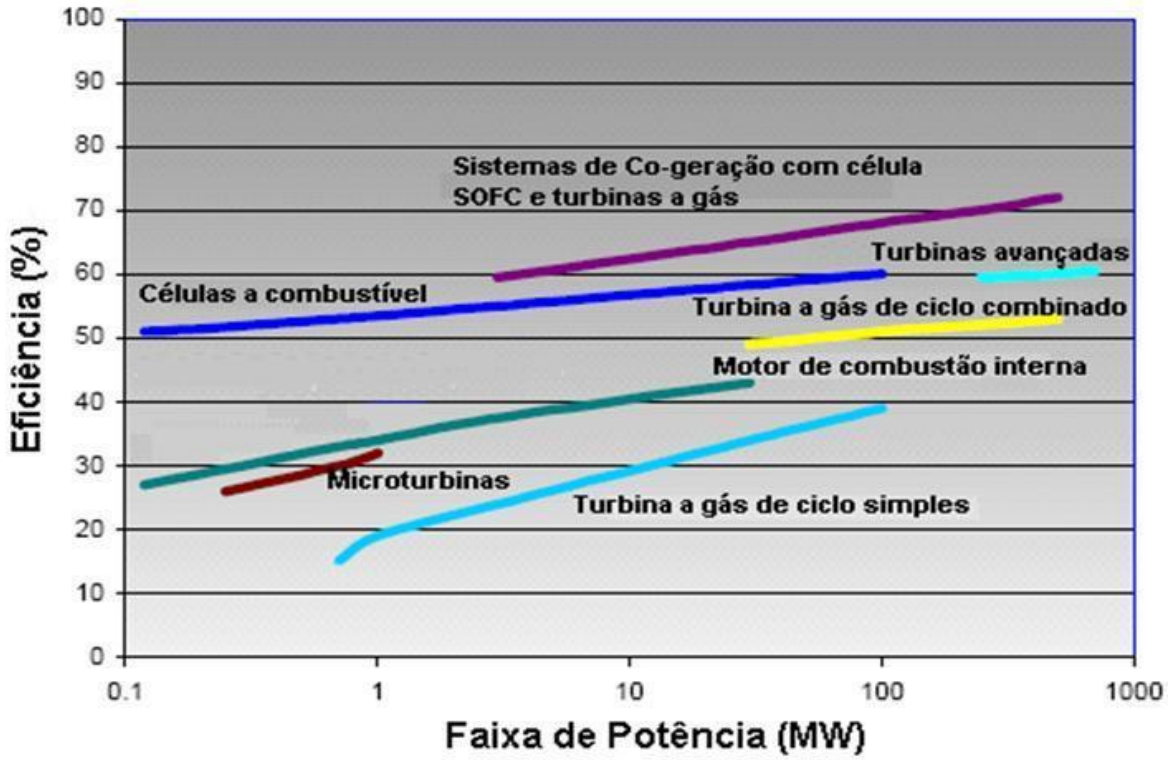
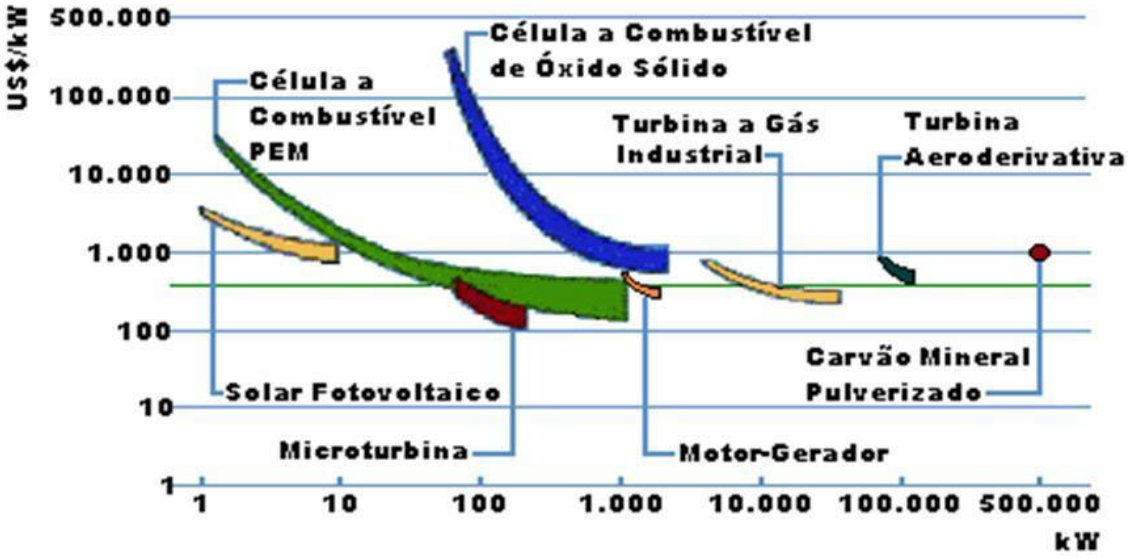


Figura 2 – Relação entre preço e capacidade instalada - adaptada de [4].



Os sistemas que produzem energia usando células a combustível apresentam ganhos significativos em termos de eficiência. Isto decorre do fato de que as células a combustível não funcionam em um ciclo térmico e por isso não se encontram limitadas pela máxima eficiência do ciclo termodinâmico.

À medida que os sistemas de célula a combustível fossem construídos e instalados, esperava-se uma queda exponencial em seus custos, atingindo patamares que permitiriam que esses equipamentos competissem de forma direta com as tecnologias convencionais e estabelecidas.

Considerando a característica desses equipamentos e a sua aplicação principalmente associada com a geração local e distribuída, no início dos anos de 2000 houve uma expectativa de que o desenvolvimento efetivo das tecnologias do hidrogênio, previsto para ocorrer até 2010, e a sua popularização, viessem a deslocar o mercado de energia das distribuidoras, uma vez que com a popularização das células a combustível haveria a possibilidade real de que o consumidor adquirisse tais equipamentos e se desvinculasse das concessionárias.

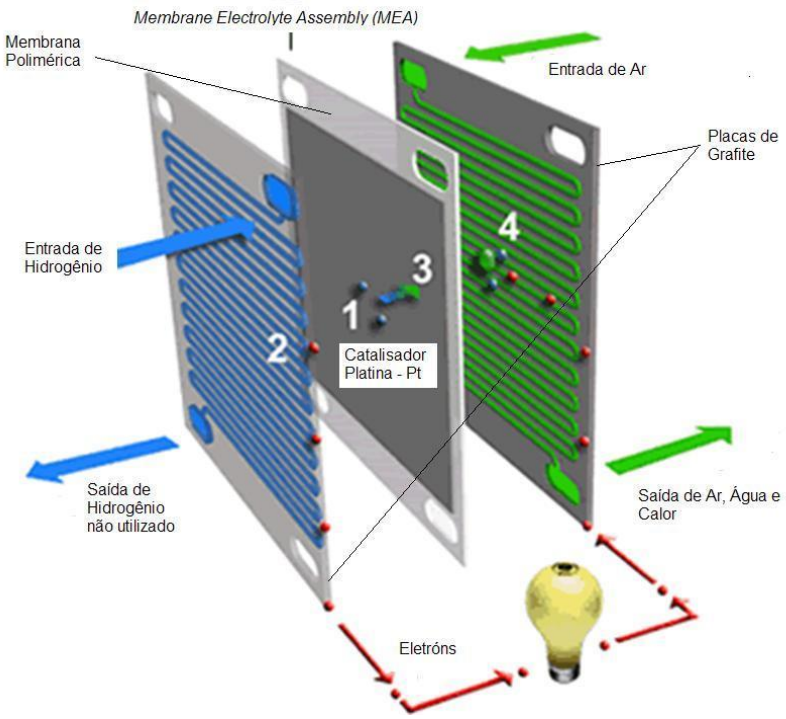
Hoje, acompanhando a tecnologia, percebe-se que os gargalos tecnológicos foram apenas mapeados em todas as pesquisas realizadas ao longo da década, mas que ainda não foram superados. Isto faz com que as projeções para efetivação das tecnologias do hidrogênio ainda permaneçam como uma visão para o futuro.

Dessa forma a importância de pesquisas em hidrogênio e células a combustível para o setor elétrico trata-se de uma oportunidade de conduzir os desenvolvimentos no sentido de se disponibilizar mais forma de se produzir energia, com benefícios ambientais, sociais e econômicos. Além disso, cabe ressaltar que se trata de uma tecnologia que utiliza conceitos completamente diversos do que o setor elétrico utiliza há séculos, o que representa também uma oportunidade de incorporação e gerenciamento de novos conhecimentos.

A característica fundamental das células do tipo PEM é a presença de polímero com função de eletrólito. A maioria dos catalisadores utilizados nas pilhas são metais nobres, em particular a platina e esse se constituem em um grande gargalo tecnológico. Isto é devido ao fato de que as reservas de platina são limitadas e os custos são elevados.

O funcionamento de uma célula a combustível tipo PEM é descrito a seguir. No ânodo o hidrogênio difunde até encontrar uma partícula de platina (Pt). A platina catalisa a reação da molécula de hidrogênio (H2) em dois íons de hidrogênio (H+). Estes íons são conduzidos através do eletrólito ou membrana para o cátodo, enquanto os elétrons resultantes da formação do íon de hidrogênio passam para o ânodo através de um circuito elétrico externo. É nesse passo que se encontra a grande importância da membrana polimérica, pois é ela quem faz o transporte de íons de hidrogênio, e somente ele de um lado para outra da célula. A Figura 3 ilustra o funcionamento básico de uma célula a combustível [3].

Figura 3 – Funcionamento de uma célula a combustível PEM.



B. Membrana Polimérica [6], [15]

O interesse pelos ionômeros começou nos anos 1940, juntamente com o início do desenvolvimento das resinas de troca iônica. Os grupos iônicos são principalmente de ácido sulfônico ou ácido carboxílico e neles os íons de hidrogênio podem ser parcial ou totalmente trocados por todos os tipos de cátions ou grupos catiônicos.

As membranas de troca catiônica de base orgânica em células a combustível foram originalmente concebidas por William T. Grubb em 1959. As primeiras membranas, fabricadas por Grubb e Niedrach da General Electric, foram ácidos sulfônicos imobilizados em uma resina fenol-formaldeído produzidos por condensação do ácido fenolsulfônico com formaldeído. No entanto, a sua fragilidade e susceptibilidade a hidrólise impediram o seu uso comercial. As resinas sucessoras, baseadas em grupamentos de poli(estireno) parcialmente sulfonados, também apresentaram desempenho insatisfatório, com vida útil de cerca de 200 horas a 60ºC.

O estado da arte no que se refere ao eletrólito polimérico utilizado em PEM, pertence à família dos materiais totalmente fluorados. Desenvolvido pela DuPont no fim dos anos 1960, o Nafion® é um copolímero formado a partir do tetrafluoretileno (TFE), formando uma espinha dorsal perfluorada, semelhante ao Teflon®, com um comonômero dotado de cadeias laterais a base de éter vinílico perfluorado terminado com grupos ácidos perfluorsulfônicos.

A membrana Nafion® foi inicialmente concebida para ser utilizada como um separador em processos eletroquímicos cloro-alcalinos para a fabricação da soda cáustica, devido à sua boa condutividade iônica, resistência química e seletividade.

A Companhia Dow Chemical produziu uma membrana similar, com cadeias ramificadas mais curtas, que apresentou uma densidade de potência duas vezes maior do que a atingida pela Nafion®, porém com baixa durabilidade.

Ao longo dos anos de pesquisa, os polímeros estirenos e seus derivados talvez tenham sido os materiais mais intensamente estudados, além da Nafion®. Dois materiais dessa família que se candidataram como membrana comercialmente viável foram as membranas BAM, desenvolvidas e produzidas pela Ballard Advanced Materials Corporation, e o copolímero de estireno sulfonado-etileno-butileno-estireno (SEBS), produzido pela Dais Analytic.

As membranas BAM foram desenvolvidas a partir de uma nova família de copolímeros sulfonados incorporando ácido α,β,β - trifluoroestireno sulfônico e ácidos α,β,β□trifluoroestireno sulfônicos substituídos. Acredita-se que esses copolímeros sejam aleatórios tanto em relação à composição dos monômeros quanto em relação à adição do grupo sulfônico. A literatura relatou que estas membranas exibiram desempenho superior às membranas perfluoradas, tal como a Nafion® 117, em densidades de corrente superiores a 0,6A.cm-2.

As membranas desenvolvidas pela Dais Analytic chegaram a atingir condutividades da ordem de 0,07S.cm-1 a 0,1S.cm-1 quando totalmente hidratadas. Os grupos estirênicos são isolados em blocos pelo direcionamento tomado pela polimerização, com isso, a sulfonação do polímero conduz à formação de blocos sulfonados, o que confere ao polímero propriedades singulares. As membranas Dais são mais baratas de se produzir do que as membranas Nafion®, além disso, elas apresentam uma rede de micro fases separadas devido à formação de blocos de diferentes graus de polimerização.

Uma forma de aumentar a vida útil do poliestireno sulfonado é a reticulação sobre uma estrutura de fluoreto de poli(vinilideno) – PVdF. Tais materiais não são redes poliméricas interpenetrantes verdadeiras, mas sim enxertos reticulados. A sua grande vantagem é associar as boas propriedades termomecânicas do PVdF, a sua resistência à oxidação e o seu caráter hidrofóbico, à rede tridimensional ionomérca de poliestireno.

Acredita-se que os polímeros aromáticos sejam também um caminho promissor para o desenvolvimento de polímeros para a aplicação como PEM devido à sua disponibilidade, processabilidade, variedade de composições e estabilidade ao ambiente da célula. A família do poli(arileno éter), como o poli(arileno éter éter cetona) e a poli(arileno éter sulfona) são foco de várias investigações. Esta família de copolímeros é atrativa devido à sua conhecida estabilidade a oxidação e hidrólise sob condições severas de uso e devido às diferentes estruturas químicas possíveis, incluindo materiais parcialmente fluorados.

Além dos polímeros perfluorados, das poli(arileno éter) e das poliimidas, várias estruturas poliméricas têm sido estudadas para serem aplicadas como membranas trocadoras de prótons, por exemplo as poli(fenilquinoxalinas) sulfonadas, poli(2,6-dimetil-1,4-óxido de fenileno) sulfonado, poli(4-fenoxibenzoil-1,4-fenileno) sulfonado, poli(4-benzoil-1,4-fenileno) homo e copolímero sulfonado, poli(ftalazinona éter cetona)s sulfonadas, poli(ftalazinona éter sulfonas)s sulfonadas, etc.

O poli(benzimidazol) (PBI) sulfonado recebeu muita atenção do meio acadêmico, tanto como bom candidato a membrana trocadora de prótons, quanto como suporte para incorporação de ácido fosfórico, produzindo membranas secas PBI/ácido fosfórico para a aplicação em altas temperaturas.

Ao longo das últimas décadas, e como pode ser visto acima, as pesquisas com novos materiais têm seguido diferentes caminhos, mas que buscam sempre, porém, o desenvolvimento de materiais que atendam aos novos requisitos de desempenho exigidos pelos sistemas. Dentre elas destacam-se:

- O estudo e a síntese de novos materiais poliméricos, como os baseados em cadeias perfluoradas sulfonadas, poli(siloxano)s, poli(imida)s, polímeros estirênicos, polímeros com cadeia principal aromática, termoplásticos de alto desempenho;
- O desenvolvimento de blendas poliméricas, com destaque para as blendas com o poli(benzimidazol) (PBI) e a resina Nafion®;
- O desenvolvimento de sistemas compósitos orgânico-inorgânico, incorporando aos materiais poliméricos, "clus-ter" de óxidos metálicos superácidos com boa condutividade protônica em estado sólido;
- Os polímeros tridimensionais baseados nas redes poliméricas interpenetrantes (IPN) e nas semi-IPNs, e os polímeros física ou quimicamente reticulados, neste caso, com destaque para os materiais baseados nos polímeros termoplásticos de alto desempenho, como as poli(éter éter cetona)s (PEEK) e as poli(arileno éter sulfona)s (PSU).

Os maiores problemas para a utilização de membranas poliméricas em células a combustível e que se constituem nos gargalos tecnológicos a serem perseguidos pelas pesquisas são: o alto custo, a necessidade de operação com gases humidificados, a limitação de temperatura de operação levando a célula a trabalhar em uma faixa de temperatura crítica para o envenenamento do catalisador se houver contaminantes nos gases de entrada e a degradação da membrana levando a uma redução a vida útil.

C. Objetivos do P&D CEMIG/ANEEL Nº 232

O projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado "Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível" – P&D CEMIG/ANEEL 232 – faz parte do ciclo 2005/2006. Foi iniciado em Agosto/2008 e teve o seu encerra-

mento em Fevereiro/2011. Resultou da parceria entre a CEMIG Geração e Transmissão SA e a Universidade Federal de Minas Gerais.

O Projeto teve como objetivo geral o desenvolvimento de nova membrana polimérica para utilização em células a combustível, com as seguintes características desejáveis [5]:

- Capacidade de se manter estável em temperaturas superiores a 100ºC;
- Menor demanda de umidificação comparativamente às atuais membranas;
- Menor custo;
- Melhor desempenho em termos de geração de energia

E, como objetivos específicos:

- Avanço no conhecimento científico e tecnológico sobre polímeros condutores;
- Desenvolvimento de um espectro de materiais poliméricos com propriedades que possibilitem o seu uso como membranas para célula a combustível;
- Consolidação de metodologia para preparação de membranas poliméricas para célula a combustível.

D. Metodologia

Para que fossem atingidos os objetivos do projeto, utilizou-se da seguinte metodologia [5]:

- Revisão bibliográfica sobre as membranas poliméricas – suas aplicações em células a combustível – e sobre as Normas Técnicas pertinentes aos ensaios em membranas poliméricas constituintes de células a combustível utilizadas na geração de energia;
- Análise dos fatores de degradação das membranas poliméricas das células a combustível;
- Seleção das células a combustível a serem estudadas;
- Execução dos testes a serem feitos nas membranas poliméricas das células a combustível selecionadas;
- Definição e aquisição dos monômeros para síntese das membranas;
- Síntese e caracterização das membranas poliméricas;
- Realização de testes com as membranas poliméricas obtidas;
- Análise preliminar dos efeitos, consequências e impactos ao sistema elétrico da CEMIG, ao meio ambiente e à sociedade, caso a produção da membrana polimérica seja alcançada com sucesso.

Devido à complexidade do desenvolvimento, e principalmente devido à incerteza de resultados não foi previsto no projeto os testes da membrana desenvolvida em uma célula a combustível. Tais testes e desenvolvimento requereriam um elevado orçamento para montagem de aparato experimental. A opção foi de mapear na literatura requisitos da membrana que a qualificassem para ser utilizada em células a combustível e pela medição de tais parâmetros, encerrando o projeto com uma análise de possíveis desenvolvimentos a serem tratados em outro projeto.

E. Benefícios do Projeto

Dentre os benefícios deste projeto para a CEMIG podem-se citar: a melhoria do processo interno podendo contribuir para a utilização de células a combustível, uma busca pela redução dos custos em relação à produção e aplicação das membranas poliméricas contribuindo para a viabilidade técnica e econômica da tecnologia, a melhor relação custo-benefício nos investimentos em célula a combustível e a atualização das informações técnicas em relação à aplicação das membranas poliméricas às células a combustível [5]. Havia a expectativa de utilizar os resultados deste projeto em outros projetos de células a combustível conduzidos pela Cemig, assim como os ganhos decorrentes de exploração de royalties.

A UFMG teve a oportunidade de consolidar o grupo de pesquisas em materiais poliméricos, abrindo uma nova frente de pesquisas em células a combustível, além da participação em seminários e congressos [5].

A indústria poderia se beneficiar pelo desenvolvimento de um novo material e rota, que neste caso possui foco na produção de membranas poliméricas para células a combustível, mas que não está restrito a este setor, podendo ter novas aplicações. O setor elétrico possui possibilidades de ganho pela utilização de uma fonte alternativa de produção e geração de energia elétrica. A sociedade, por sua vez, seria beneficiada pela viabilização de alternativa energética, com opção de fonte renovável e com emissões reduzidas, se traduzindo em ganho ambiental, econômico e social [5].

F. Definição dos Monômeros para Síntese das Membranas

A membrana de troca protônica Nafion® produto DuPont, foi desenvolvida nos anos sessenta e até o momento constitui a base para as PEM comercialmente disponíveis. Sua estrutura química composta por poli(ácido perfluorosulfônico) confere ao material estabilidades química, mecânica e térmica excelentes, além de elevada condutividade protônica e tempo de operação elevado (60.000 h a 80o C)[12].

Como desvantagens citam-se:

- O custo elevado: na década de 1960 este custo atingiu a ordem de USD100.000/kW de equipamento. Este custo reduziu significativamente ao longo do tempo, mas ainda não se estabeleceu em valores que possibilitem que um equipamento tenha custo comercial atrativo. Estima-se que tais sistemas

sejam economicamente viáveis se o custo de fabricação atingir US$400/kW até 2015 de acordo com as metas do US-DOE [16];

- Baixas temperaturas de operação onde a condição catalítica se apresenta como crítica. Em maiores temperaturas a cinética é favorável para a reação, mas a membrana se degrada em temperaturas superiores a 120 ºC;
- Baixa condutividade para baixos teores de água. Neste caso o gerenciamento de água num empilhamento se apresenta como essencial e crítico, pois possui implicações na paralisação do funcionamento do equipamento.

Para aplicação em células a combustível a metanol líquido, as membranas perfluoradas apresentam uma elevada perda de desempenho devido ao alto grau de permeação do combustível na membrana sem ser convertido em energia útil [12].

Como alternativa à membrana Nafion®, foram estudadas as características de diversas classes de membranas e a adequação de suas propriedades ao uso em células a combustível [12]. O grau de sulfonação e o grau de reticulação exercem influência nas propriedades de interesse das membranas poliméricas.

O grau de sulfonação possui um caráter ambíguo com relação ao desempenho da célula. Por um lado, a maior presença de agrupamentos ácidos sulfônicos (-SO3H) na membrana aumenta a condutividade protônica, uma vez que facilita os dois mecanismos de transporte de prótons (devido ao aumento da concentração dos condutores de carga e da sua mobilidade). Por outro, quanto mais agrupamentos ácidos, mais água será absorvida pela membrana, pois o grupo ácido é altamente hidrofílico, o que diminui sua resistência mecânica, e, caso ocorra acúmulo de água no cátodo (*flooding*), haverá diminuição também da condutividade protônica [8].

Espera-se que com a reticulação várias propriedades desejáveis de uma membrana para aplicação em células a combustível sejam melhoradas, principalmente o controle da absorção de água, controlando o inchamento da membrana. Adicionalmente, a diminuição da susceptibilidade aos efeitos da degradação química e a melhoria das propriedades mecânicas, como fadiga e resistência à tração/compressão. Como mencionado anteriormente, deseja-se desenvolver um material que mantenha uma boa condutividade protônica com uma menor necessidade de umidificação, desejavelmente melhorando a sua resistência química e mecânica. Pode-se demonstrar que a estrutura tridimensional que caracteriza os polímeros reticulados tem um papel fundamental, uma vez que a absorção de água pela membrana é limitada fisicamente pela sua capacidade de acomodação das moléculas de água na rede do polímero. A absorção de água pelo polímero tende a ser tão maior quanto mais compatível ele for, ou seja, apresentar grupamentos funcionais polares e característica iônica dada pelos grupos ácidos. Porém, a quantidade de água que o polímero será capaz de acomodar entre as suas moléculas reticuladas será limitada pela capacidade de rearranjo da sua estrutura e pela capacidade de estiramento das suas ligações covalentes [8].

G. Desenvolvimento Experimental da Membrana [2]

A partir da revisão de literatura, foram levantadas as condições ideais das características da membrana aplicável a célula a combustível. A partir dessas características foram mapeados os polímeros existentes e definidas as configurações de polímeros que atendessem a estes requisitos. Diante disso, foi planejada síntese de polímeros que efetivamente produziria a membrana.

Dessa forma o monômero 2,2'-dialilbisfenol-A (ABFA) foi obtido através do rearranjo de Claisen do 2,2- bis(4-aliloxifenil)propano (BFAAE), sintetizado a partir do Bisfenol-A (BFA). O BFA foi adquirido diretamente da Sigma-Aldrich® e utilizado sem nenhum tratamento ou purificação adicional. Os demais reagentes: acetona, brometo de alila (3-bromo-1-propeno), carbonato de potássio anidro, metanol, n-hexano, N-metil-2-pirrolidinona (NMP), N-N'-dimetilacetamida (DMAc) e tolueno, foram adquiridos de fontes comerciais e utilizados sem nenhum tratamento ou purificação adicional. O procedimento para síntese do BFAAE foi adaptado de Feng e colaboradores [13].

Os experimentos de rearranjo de Claisen termicamente iniciado foram realizados utilizando um DSC modelo 2920 da TA Instruments, utilizando cadinhos de alumínio herméticos, contendo cerca de 10mg de amostra. Os experimentos foram realizados em atmosfera de nitrogênio 4.5 a uma vazão de 75mL/min em isoterma, por um período de tempo definido, seguindo uma matriz de planejamento fatorial de experimentos com dois fatores e três níveis. Após cada experimento, uma amostra do produto foi analisada por meio das técnicas de Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), Termogravimetria (TG) e Cromatografia Líquida de Alto Desempenho (HPLC), para caracterização e acompanhamento da reação.

H. Degradação de Membranas Poliméricas

Um estudo de degradação é relevante porque cada tipo de material polimérico poderá sofrer diferentes reações de degradação, dependendo de sua estrutura química, de seu modo de processamento e de sua forma de uso. Portanto, antes de se iniciar a produção de um artefato polimérico é necessário conhecer ou simular o seu comportamento, do ponto de vista da estabilidade, nas condições em que será usado [10].

A degradação de polímeros pode ser considerada como qualquer tipo de modificação indesejada na cadeia polimérica principal, nas ramificações ou em ambas. Essas modificações são geralmente de ordem química, ou seja, envolvem a quebra de ligações primárias, levando à redução da massa molar e à alteração das propriedades físicas. As causas de degradação podem ser ambientais, induzidas ou como resultado de processamento devido à luz e ao calor [6].

A degradação de um polímero pode ser convenientemente classificada em cisão, eliminação, auto oxidação e despolimerização [10]. Qualquer que seja a forma de degradação ou o tipo de classificação, a primeira etapa da degradação, a iniciação,

está sempre relacionada ao rompimento de uma ligação química covalente, na cadeia principal ou em ramificação. A ruptura dessa ligação gera espécies reativas responsáveis pela propagação do processo. Em geral, essas espécies reativas são radicais livres. Durante a produção, o processamento e o uso, os materiais poliméricos estão expostos a condições ou solicitações que possibilitam a iniciação de reações de degradação [10].

A cisão, ou rompimento de uma ligação química, pode ocorrer pela quebra de uma ligação carbono-carbono simples, na cadeia principal ou em uma ramificação, quando a energia em uma determinada ligação for superior à energia da ligação [10].

Polímeros obtidos por reações por crescimento da cadeia (adição) podem sofrer cisão por energia fornecida por diferentes formas: luz (fotólise), radiação gama (radiólise), calor (termólise) ou cisalhamento (rompimento mecânico). Polímeros obtidos por reações por etapas (condensação) podem também sofrer cisão por hidrólise, que consiste na reação de uma molécula de água com um determinado grupo químico, com quebra de ligação e adição de oxigênio e de hidroxila a cada um dos grupos restantes [10.]

Dependendo da forma como a degradação se inicia, a cisão pode ser homolítica ou heterolítica. Na cisão homolítica, mais comum, dois radicais livres são formados, com um elétron ligado a cada um dos fragmentos. Após a formação dos radicais, pode haver propagação, recombinação intramolecular, resultando em ciclização da cadeia polimérica ou recombinação intermolecular, resultando em reticulação da cadeia polimérica. A reticulação leva a um aumento da massa molar média. Na cisão heterolítica, favorecida quando se tem alta energia, como é o caso da radiólise, o par de elétrons fica ligado a um dos fragmentos, formando-se, portanto, um ânion e um cátion [10].

Na degradação sem cisão de cadeias ocorre o rompimento da ligação do carbono da cadeia principal com um substituinte (C-R), seguido da quebra de uma ligação C-H e formação de uma ligação dupla C=C, resultando na eliminação de uma molécula RH. Por Essa razão, é chamada de reação de eliminação. Não há uma diminuição da massa molar média do polímero, mas ocorre uma mudança significativa em suas propriedades químicas e físicas. A reação é auto catalítica e se propaga formando uma sequência de ligações duplas conjugadas (ligações C=C e C-C, alternadas). Macroscopicamente, observa-se a mudança de cor [10].

Polímeros podem, também, se degradar por um processo conhecido como auto oxidação. É um processo auto catalítico que ocorre em três etapas: iniciação, propagação e terminação. Como o oxigênio tem dois elétrons não compartilhados, ele reage espontânea e rapidamente com qualquer radical livre no meio, formando um radical peroxila (R-O-O.) [10].

A despolimerização é classificada como o reverso do processo de polimerização e ocorre em polímeros com substituintes em um dos carbonos. Tem como resultado o monômero que deu origem ao polímero que está se degradando. Ocorre, em ge-

ral, em altas temperaturas, com o polímero no Estado fundido, sendo, também, um processo auto catalítico [10].

Os processos de degradação em polímeros ocorrem sempre, em maior ou menor intensidade, independentemente do tipo e do uso do polímero. Portanto, é sempre necessário o uso de aditivos para retardar ou minimizar o processo de degradação. Esses aditivos atuam desativando os produtos reativos da degradação ou consumindo os produtos da reação de iniciação. Normalmente são acrescentados ao material polimérico no momento de seu processamento, mas podem também ser acrescentados ao polímero no momento de sua granulação. Em geral, são classificados em função da reação que eles evitam ou retardam ou em função da etapa do processo onde eles atuam. O mecanismo de atuação da maioria deles envolve a desativação de radicais livres ou decomposição de hidroperóxidos. Normalmente, os aditivos mais eficientes são aqueles que podem se autorregenerar em um ciclo catalítico. Somente no caso da fotodegradação é que existem aditivos de ação específica [11].

Aditivos utilizados para inibir processos de degradação são denominados genericamente de estabilizantes. Como a degradação é um processo específico e relacionado com a aplicação e o uso do artefato polimérico, o estabilizante é selecionado para inibir o processo de degradação que acarretará na mudança da propriedade que reduzirá o tempo de uso do artefato em uma aplicação específica. O termo estabilizante é usado para descrever uma ampla gama de compostos químicos que inibem processos degradativos em polímeros, causados por qualquer tipo de iniciação [11].

I. Dificuldades encontradas

De maneira geral, as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento dessa pesquisa foram as que comumente são encontradas e estão relatadas em outros projetos de P&D do âmbito Cemig/Aneel, como por exemplo:

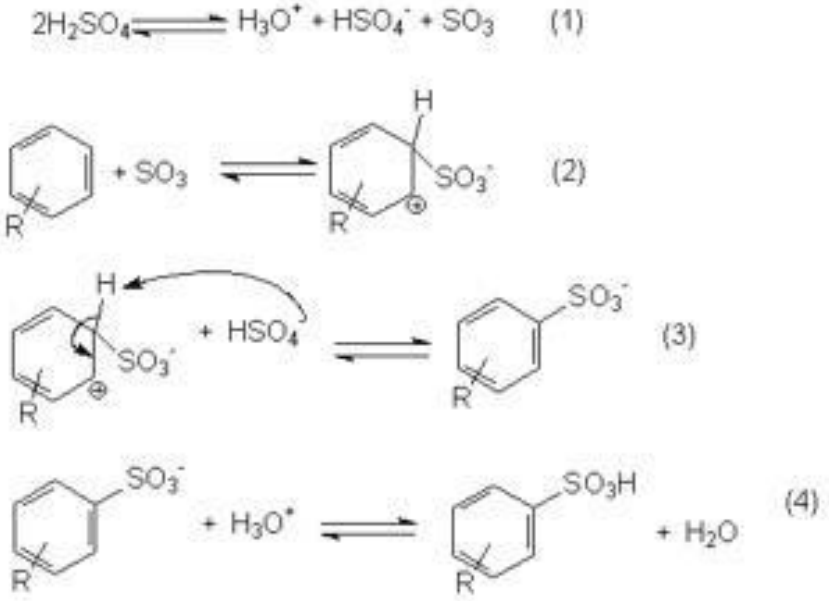
- Informações escassas ou ausentes, considerando-se a natureza da pesquisa;
- Dificuldades na motivação e mobilização de recursos humanos;
- Projetos elaborados sem um planejamento mais acurado, levando-se a necessidade de constantes alterações;
- Burocracia excessiva, levando-se a atrasos generalizados;
- Dificuldades técnicas, também inerentes a complexidade da pesquisa.

J. Estudo da Influência do Grau de Sulfonação de um Poliéster nas Propriedades de Interesse para sua Aplicação como Membrana de Troca Protônica em Célula a Combustível do Tipo PEM

Dentro da proposta de um estudo focado na influência do grau de sulfonação nas propriedades de interesse de uma membrana no que diz respeito à sua aplicação em célula a combustível, é preciso que o sistema polimérico escolhido seja tal que

esse parâmetro seja facilmente variado durante sua síntese. O sistema, constituído de poli(ftalato de glicerina) com diferentes graus de sulfonação, inicialmente foram preparados os monômeros a partir da reação de sulfonação do ácido ftálico por meio de uma reação de substituição eletrofílica, conforme mostrado na Figura 4. Foram obtidos monômeros com três níveis de sulfonação do ácido ftálico (AFS1, AFS2 e AFS3) pela utilização de três concentrações de ácido sulfúrico)[13].

Figura 4 – Reação de sulfonação do ácido ftálico por meio de uma reação de substituição aromática eletrofílica.



K. Estudo da Influência do Grau de Reticulação e do Grau de Sulfonação sobre as Propriedades de Interesse de uma Poli(arileno éter sulfona)s sulfonada para a sua Aplicação como Membrana Trocadora de Prótons (PEM)

O sistema estudado foi baseado nas poli(arileno éter sul-fona), uma vez que este tipo de polímero é reconhecido pela sua boa resistência a agentes químicos, oxidantes e redutores, meio ácido e meio básico, além de possuir boa resistência mecânica. O sistema escolhido foi funcionalizado, ou seja, foram adicionados à matriz dos polímeros grupos ácidos sulfônicos e grupos propenílicos, utilizados como ponto de reticulação, iniciada com peróxido de benzoíla (BPO). O estudo esteve baseado na variação simultânea dos graus de sulfonação e reticulação, através de ferramentas estatísticas de planejamento de experimentos, permitindo compreender o efeito de cada fator, de forma isolada ou associada, sobre as propriedades de maior interesse da membrana.

As etapas realizadas foram [13]:

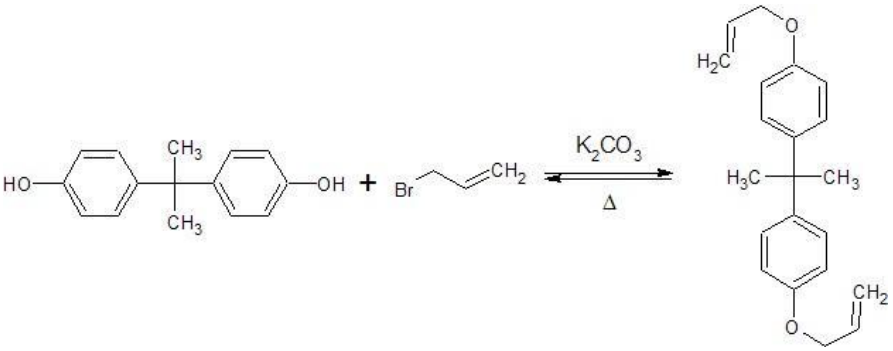
- Síntese do 2,2'-dialilbisfenol A (ABFA)

A síntese do 2,2'-dialilbisfenol A (ABFA) envolveu duas etapas distintas, a saber:

- Síntese do 2,2-Bis(4-aliloxifenil)propano (BFAAE)

Esse composto intermediário foi sintetizado pela reação do bisfenol A (BFA) com brometo de alila, tendo como referência o trabalho de Feng e colaboradores (2009). O esquema de síntese do BFAAE a partir do BFA é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema de síntese do BFAAE a partir do BFA.



O produto da síntese foi analisado e caracterizado pelas técnicas de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC), que confirmaram a obtenção do produto desejado. A termogravimetria (TG) do produto mostrou que a degradação do BFAAE ocorre em estágio único, representando, aproximadamente, 97% da massa inicial de material.

- Rearranjo de Claisen e obtenção do ABFA

Com o intuito de se obter o composto final ABFA via rearranjo de Claisen do BFAAE, diversas condições de tempo e temperatura para o tratamento térmico foram utilizadas.

A Figura 6 apresenta a sequência de isomerização identificada como o processo de rearranjo de Claisen termicamente iniciado para o composto BFAAE produzindo o ABFA. Após cada etapa do processo de síntese, uma amostra representativa do produto foi coletada e analisada utilizando-se as técnicas de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e termogravimetria (TG), para caracterização e acompanhamento da reação.

- Síntese do bis(6-sulfonato,4-clorofenil)sulfona de sódio

O monômero bis(6-sulfonato,4-clorofenil)sulfona de só-dio (SCFS) foi obtido com base no trabalho de Sankir e colaboradores (2006), por meio da sulfonação do monômero bis(4-clorofenil)sulfona (CFS), conforme reação mostrada na Figura 7.

Figura 6 – Mecanismo de transferência do rearranjo de Claisen para a obtenção do ABFA.

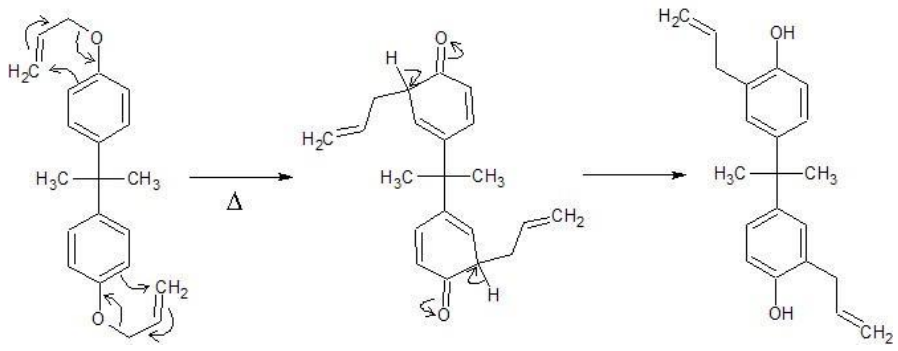
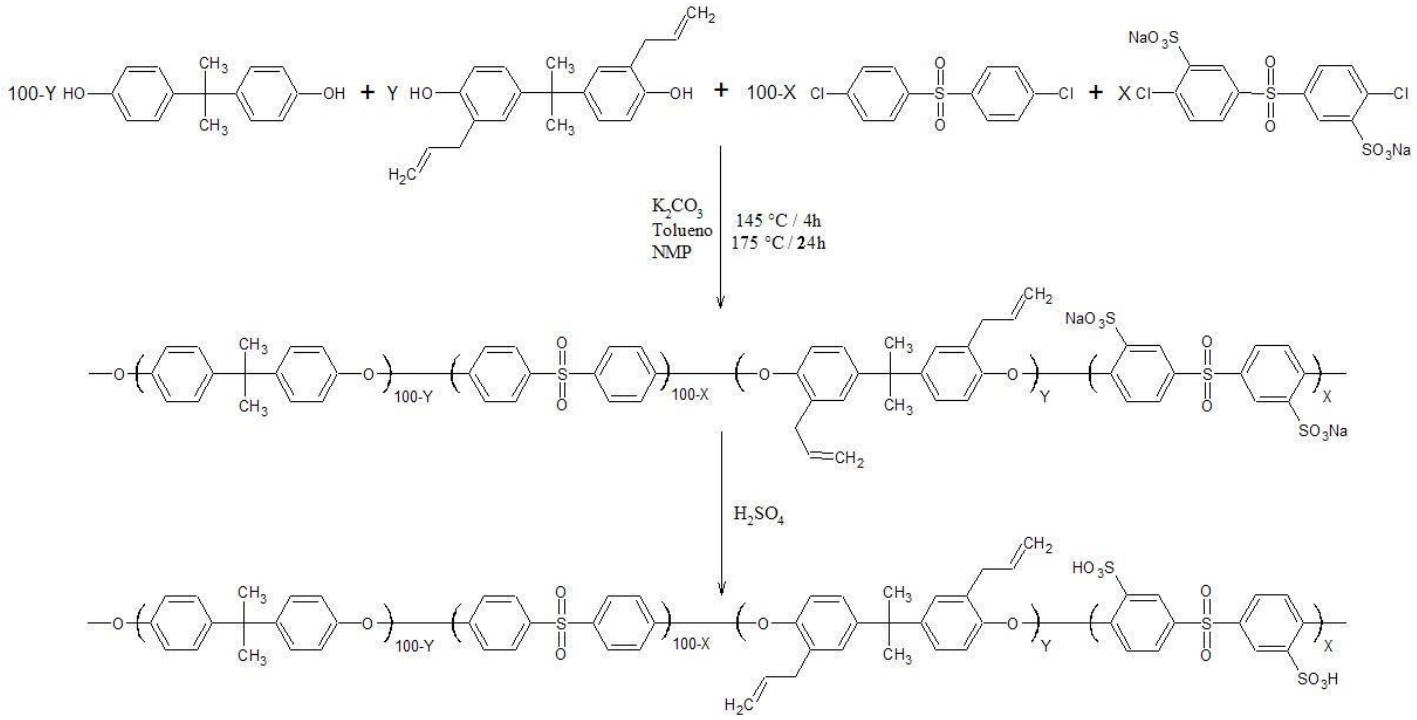


Figura 7 – Mecanismo da substituição eletrofílica aromática no processo de sulfonação do anel aromático bis(4-clorofenil)sulfona.



8.3 Resultados

Após a síntese, uma amostra representativa do produto foi coletada e analisada comparativamente ao seu precursor. A espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) confirmou a obtenção do produto desejado por meio da observação das bandas características do SCFS. A termogravimetria indicou a presença de 3% m/m de umidade.

- Síntese do polímero e obtenção da membrana

As poli(arileno éter sulfona)s sulfonadas são sintetizadas via copolimerização direta através de uma reação de substituição nucleofílica. A Figura 8 mostra o esquema reacional para a síntese da poli(arileno éter sulfona)s sulfonada reticulável.

A Figura 9, abaixo, ilustra a evolução da reação de polimerização. A Figura à esquerda mostra o início da reação, a figura central o reator após 4 horas de reação a 140°C e a Figura à direita o aspecto final da mistura após 24 horas a 175°C.

Figura 8 – Esquema reacional para a síntese da poli(arileno éter sulfona)s sulfonada reticulável.

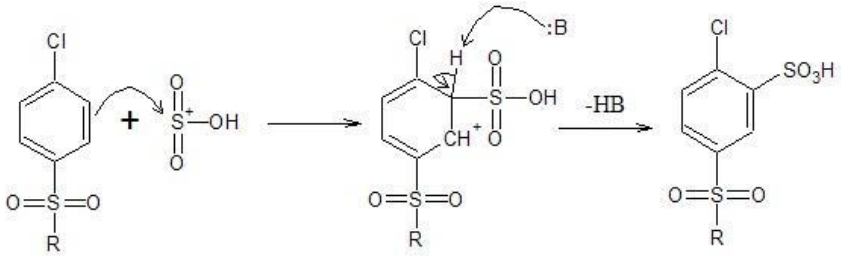


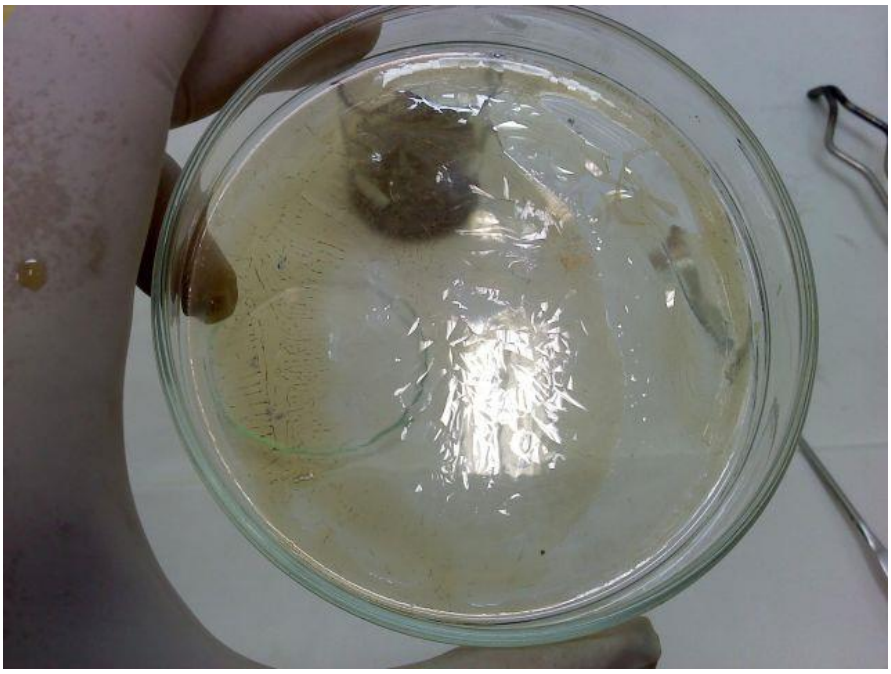
Figura 9 – Evolução da reação de polimerização.

Ensaios qualitativos com íon prata (Ag+) para a presença do íon cloreto (Cl-) no material filtrado da solução de síntese foi positivo, evidenciando que o processo de polimerização ocorreu segundo o mecanismo proposto.

A membrana reticulada foi preparada por casting da solução a 10% m/m do polímero em N-N'-dimetilacetamida, com 3% m/m de peróxido de benzoíla (BPO), seca a 120°C por 12h em estufa comum e, a seguir, seca sob vácuo a 180°C por mais 2h. A membrana foi convertida à forma ácida pela sua imersão em solução 0,5mol/L de ácido sulfúrico em ebulição por 2 horas, seguida de tratamento em água deionizada em ebulição por mais 2 horas e de secagem a vácuo a 120°C por 12 horas.

O produto obtido apresentou um aspecto vítreo e quebradiço, conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Membrana obtida apresentando aspecto vítreo e quebradiço.



8.4 Discussão dos Resultados

As discussões apresentadas a seguir são um extrato, conforme descrito em [14]-[15].

O estudo do efeito do grau de sulfonação de um polímero para aplicação em célula a combustível só estaria completo após a polimerização dos monômeros AFS1, AFS2 e AFS3 obtidos. Para o estudo da influência do grau de reticulação e do grau de sulfonação de um polímero para aplicação em célula a combustível, novas

etapas, que envolvessem a síntese de membranas similares, com diferentes graus de reticulação e sulfonação, seriam essenciais para efeito de comparação de suas propriedades de interesse. Em seguida, seria necessária a realização dos testes propostos para a caracterização tanto das membranas com diferentes graus de sulfonação como também das membranas reticuladas. Testes como: análise térmica (TGA e DSC), FTIR, difração e fluorescência de raios-X, microscopia, ressonância magnética nuclear – RMN, absorção de água e grau de expansão, capacidade de troca iônica – IEC, condutividade protônica, espessura da membrana, grau de sulfonação, propriedades mecânicas e estabilidade oxidativa (Teste de Fenton) poderiam descrever o desempenho e possibilitar um estudo detalhado da degradação das novas membranas produzidas.

O composto foi sintetizado BFAAE com bom rendimento molar (94,5%) e pureza (97,3%), como demonstrado por termogravimetria, cromatografia e espectroscopia, análise, por meio do qual a estrutura do composto intermediário foi confirmada.

O estudo do rearranjo de Claisen permitiu as seguintes conclusões: através de FTIR técnica, ABFA estrutura química foi confirmada por análise das bandas características do composto tratado a 220 º C durante 60 minutos. Os resultados, de acordo com os três técnicas de caracterização utilizadas, forneceu a prova da ocorrência de um térmico processo de decomposição, o que, aparentemente, produz uma mistura de fenóis, que reduzem o conteúdo ABFA convertido das amostras dos grupos G4 e G5 e infravermelha absorção de radiação na região característica de grupos-OH.

Os resultados obtidos sugerem que, no intervalo estudado de polimerização, e a degradação do monómero ABFA ocorrer, simultaneamente, a sua formação. Finalmente, conclui-se que o processo de rearranjo de Claisen termicamente iniciado atinge um óptimo, em termos de conversão de BFAAE em ABFA, no grupo G3, o que significa, em amostras tratadas a 210 °C/90min., 220 °C/60min. e 230 °C/30min., em que o obtido Conteúdo ABFA é tão elevada como 85% - 90%, como determinada a perda de massa (Pm) obtido por TG, e ligeiramente semelhante maior do que o produto comercialmente encontrado.

Outras etapas posteriores devem ainda envolver estudos para a otimização dos processos executados tanto nas sínteses dos monômeros como na polimerização, visando atingir um nível de produção industrial das membranas para células a combustível.

Como parte da metodologia proposta, foi realizado um estudo dos efeitos, consequências e impactos ao sistema elétrico da CEMIG, ao meio ambiente e à sociedade. Os principais pontos levantados são apresentados a seguir.

Existem relativamente poucos trabalhos detalhados publicados, atualmente, sobre a viabilidade econômica de sistemas de células a combustível para residências. Para um investimento econômico, a instalação de células deve ter a potencia nominal mais próxima possível da demanda media da residência [6]. Outra questão que

possui influência trata da comercialização exclusiva de eletricidade. No Brasil não há tradição em comercialização de calor/frio, que são subprodutos de células a combustível. Dessa forma o custo de instalação ainda se mantém muito elevado em relação aos outros sistemas de geração convencional disponíveis no mercado.

Pequenas instalações de células a combustível para aplicações residenciais abrirão um novo mercado no ramo de serviços de energia e de fornecedores de gás, se o custo da instalação for suficientemente competitivo. Mesmo a preços um pouco acima dos convencionais, essa tecnologia já pode assegurar um mercado específico e promissor, no qual suas características principais (como baixo impacto ambiental e melhor aproveitamento do combustível) passam a ter um papel relevante na escolha final. Observa-se que, nos períodos do dia de menor consumo nas residências, o excesso de energia, produzido nas instalações residenciais, pode ser incorporado à rede pública. Este fato pode ser lucrativo para o gerenciador da rede, que vê no conjunto de células a combustível uma grande reserva de energia. Este conjunto de instalações individuais, controladas separadamente, pode ser visto como uma grande usina de energia distribuída. Entretanto [6].

8.5 Conclusões

A CEMIG pôde, com esse projeto, alcançar os resultados esperados:

- Contribuição à área de alternativas energéticas da CEMIG;
- Formação de recursos humanos: um mestre e um aluno em iniciação científica (graduação);
- Consolidação de Núcleo de Competência na área de membranas poliméricas para células a combustível.

Devido ao fato de que o rearranjo de Claisen é muito sensível ao tempo/temperatura de tratamento, acredita-se que os resultados obtidos podem ser melhorados, obtendo-se o desejado ABFA monómero com uma pureza mais elevada, adequada para o uso como um precursor para a obtenção de membrana trocadora de prótons baseado em éter sulfonado reticulado (poli arileno sulfona)s. Uma análise dos resultados obtidos pelas etapas acima descritas demonstra que ainda há etapas a serem desenvolvidas para que se tenha o entendimento do comportamento da membrana polimérica sintetizada em uma célula a combustível.

Além disso, obteve-se avanço no conhecimento científico e tecnológico sobre polímeros condutores. Foi também desenvolvida e pesquisada a tecnologia de preparação desse tipo de membranas poliméricas. O grande problema é que o desenvolvimento resultante deste projeto é insuficiente para se aplicar em instalações piloto. Para sua aplicação se faz necessário o prosseguimento de caracterização e aos estudos de desempenho da membrana, realizando uma varredura construtiva. Uma ilustração do que foi dito, como um exemplo mais claro é o seguinte. Se o desenvolvimento deste projeto fosse o desenvolvimento de um motor ao final haveria o protótipo de um motor pronto. Mas para que haja a substituição de motores

do mercado se faz necessário o desenvolvimento de inúmeros protótipos de forma a se conseguir um produto realmente comercial. Este é o caso dessa pesquisa. Foi desenvolvida uma membrana, mas para que ela de fato esteja pronta comercialmente é necessário que sejam desenvolvidos diversas variações da mesma de forma a se atingir a maturidade científica e comercial em um produto competitivo e inovador.

Como já foi constatado nas seções anteriores, destaca-se a necessidade de que se continue investindo em pesquisa da aplicação de membranas poliméricas a células a combustível, com o intuito de se desenvolver tecnologia nacional nessa área, que tem se demonstrado estratégica para as empresas de energia.

Não há dúvida de que há, ainda, um longo caminho a ser percorrido para se alcançar metas de redução de custo. Neste caminho, dois aspectos devem ser ressaltados: a importância de investimento em pesquisa na área e a mudança na estratégia de geração de energia de, atualmente, centralizada, para distribuída. Pode-se, também, afirmar que, devido aos grandes investimentos nessa área e ao apelo ambiental, no médio prazo, haverá uma competitividade nos custos para instalações de células a combustível de baixa potencia para aplicações residenciais.

As sugestões de projetos futuros encontram-se ainda associadas com a pesquisa básica em engenharia de polímero para continuar o desenvolvimento da membrana e os testes em células a combustível.

Os objetivos do projeto na proposta deste P&D foram atingidos, uma vez que uma nova membrana foi sintetizada e teve os parâmetros comparados com requisitos. Foi desenvolvida uma nova membrana polimérica com potencial para ser utilizada em células a combustível. Contudo, através do desenvolvimento deste projeto foi possível verificar que apesar do sucesso no desenvolvimento de uma membrana, existe uma grande distância entre os resultados deste projeto e a sua aplicação em uma célula a combustível de maneira comercial. O produto deste projeto se constitui em apenas um protótipo e após o desenvolvimento no projeto fica claro que para se obter um produto comercial existe a necessidade de milhares de protótipos para que se tenha sucesso na aplicação do produto desenvolvido no mercado e que os protótipos mais promissores tenham efetivamente realizado os testes substituindo a membrana Nafion em células a combustível..

O projeto foi encerrado, mas a equipe executiva da UFMG continua os desenvolvimentos necessários na direção de um produto comercial, e tratando como desenvolvimento científico pela Universidade.

Capítulo 9

Capítulo 9: Desenvolvimento de Catalisadores para a Reforma de Biomassa e produção de Hidrogênio[9]

Resumo- **O uso do hidrogênio como vetor energético necessita de ultrapassar algumas barreiras. Dentre elas, a produção se apresenta como uma oportunidade de pesquisa. Para que o hidrogênio tenha um foco sustentável, ele deve vir necessariamente de fontes renováveis. A biomassa residual, constituída pelo glicerol trata-se de uma opção interessante tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Este artigo relata o desenvolvimento de catalisadores para a reforma de glicerol, que é o projeto de P&D 288 resultante da parceria entre Cemig GT e Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Os resultados da pesquisa são promissores, mas também indicam a complexidade e dificuldade inerente a este campo da ciência. A grande aplicabilidade para o setor elétrico é expressa pela popularização das tecnologias de uso do hidrogênio para a cogeração, se constituindo no futuro da energia.**

9.1 Introdução

O futuro da energia aponta para a economia do hidrogênio. Tal tendência pode ser visualizada através da análise do uso dos energéticos ao longo da história, percebendo-se a descarbonização da fonte. A descarbonização da fonte pode inclusive contribuir para se minimizar o grande problema da atualidade, que é justamente a emissão de gases de efeito estufa, composto majoritariamente por compostos de carbono.

Entretanto, o grande e maior problema da economia de hidrogênio é que este combustível não se encontra disponível na forma adequada para o uso, uma vez que, se encontra ligado a outros átomos em formas mais estáveis e complexas. Existem outros importantes gargalos ao longo de toda a cadeia de uso energético do hidrogênio. É importante ressaltar que o hidrogênio já é produzido a mais de um século e possui aplicações em diversos segmentos industriais, não se constituindo por si só em uma novidade. Nem mesmo o uso energético é novo, pois a ida do homem a Lua, na década de 1960 fez uso do hidrogênio como energético. Contudo, na atual situação, o hidrogênio possui um mercado estabelecido, com insumos e produtos, custos e preço associados a dinâmica de mercado na forma de insumos químicos.

Neste contexto, projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (P&D) em hidrogênio energético se fazem necessários para mapear condições ótimas e de requisitos, desenvolver aplicações e mercado ou superar gargalos tecnológicos.

[9] SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V. ; SOARES, R. R.. Publicado em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

A produção de gás hidrogênio (H2) é feita prioritariamente pelos processos de reforma de gás natural e por eletrolise da água, na proporção aproximadamente de 95% e 5%, respectivamente [1]. Sendo assim, a produção de hidrogênio através do processo termoquímico de reforma a vapor é tecnicamente viável. Com o desenvolvimento desta tecnologia o hidrogênio pode se tornar um insumo energético alternativo e renovável para o país. Além disso, contribui para o desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio combustível no país, que pode ser utilizado em veículos elétricos equipados com células a combustível e, desta forma, contribuir para a diminuição das emissões de poluentes ao meio ambiente.

Os processos catalíticos têm sido apontados como um dos pilares para o desenvolvimento de uma economia baseada na utilização do hidrogênio, oferecendo soluções para a produção de hidrogênio usando biomassa e biogás, reforçando ou assegurando o caráter renovável da fonte primária [2].

Este projeto tratava-se da continuidade do P&D 108 – Produção de Hidrogênio por reforma de etanol [3]. Neste projeto foi desenvolvido um protótipo de reformado de etanol, transportável com vistas a aplicação energética do hidrogênio. Entretanto, um dos grandes problemas desta pesquisa inicial foi que o catalisador utilizado no processo de reforma foi o Níquel, catalisador comercial para o processo de reforma de gás natural. Este produto funciona, com restrições, e também fora dos melhores requisitos de produção de gás natural. Tal situação possui impactos significativos tanto em termos de produtividade, quanto na própria viabilidade técnica e econômica do equipamento. Desta forma surgiu este projeto de pesquisa, P&D GT 288 (Código Aneel: PD-4591-0288/2008), cujo objetivo central é o desenvolvimento de catalisadores para a reforma de biomassa com finalidade de produzir hidrogênio para fins energéticos.

A metodologia proposta para se alcançar os resultados é a pesquisa experimental e como principais resultados esperados para o projeto eram: melhor entendimento do processo de reforma e o desenvolvimento de catalisadores para reforma de biomassa.

A grande aplicação do projeto é sem dúvida na contribuição para a constituição de uma massa crítica capaz de pensar o hidrogênio energético no âmbito nacional e na preparação das empresas e sociedade para um futuro energético renovável e sustentável.

Este projeto foi desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia e foi encerrado em Dezembro/2012.

9.2 P&D GT 288 – Reforma de Biomassa

O projeto é uma oportunidade de atendimento às necessidades do setor elétrico e possibilitará desenvolver catalisadores através de preparação, caracterização, verificação da atividade catalítica e realização de testes de catalisadores que promovam a reação de reforma para obtenção de hidrogênio. Os objetivos específicos do projeto são listados a seguir [2]:

- Desenvolver rotas catalíticas e catalisadores viáveis;
- Levantar dados operacionais visando tornar ótima a reação de reforma;
- Realizar análises econômicas e termodinâmicas;
- Customizar e realizar ensaios experimentais em um protótipo de reformador.

A. Metodologia

A Metodologia é composta das seguintes etapas, que serão desenvolvidas para se atingir os objetivos deste projeto [2]:

- Etapa 1 - Estudo da Bibliografia Disponível e Definição das Rotas Viáveis;
- Etapa 2 - Estudo das Reações Químicas Envolvidas no Processo de Reforma de Biomassa;
- Etapa 3 - Testes em Escala Laboratorial dos Catalisadores na Reação de Reforma de Biomassa;
- Etapa 4 - Otimização do Sistema para a Reação Global;
- Etapa 5 - Realização dos Testes Catalíticos Finais;
- Etapa 6 - Análise, Modificações e Testes Experimentais do Protótipo;
- Etapa 7 - Análise Econômica dos Reformadores: Determinação do custo de produção de Hidrogênio;
- Etapa 8 - Conclusões e elaboração do Relatório Final.

B. Revisão bibliográfica

A produção de H2 e/ou gás de síntese (CO+H2) utilizando materiais renováveis podem ser consideradas entre os principais desafios devido à importância que estes têm nas indústrias citadas. Gás de síntese pode ter todo seu monóxido de carbono (CO) convertido a CO2 e H2 mediante reação com vapor de água, chamada reação de deslocamento ou *Water-Gas-Shift* (WGS). Gás de síntese pode ser ainda usado diretamente em geradores elétricos ou convertidos, direta ou indiretamente, em combustíveis líquidos ou metanol [4].

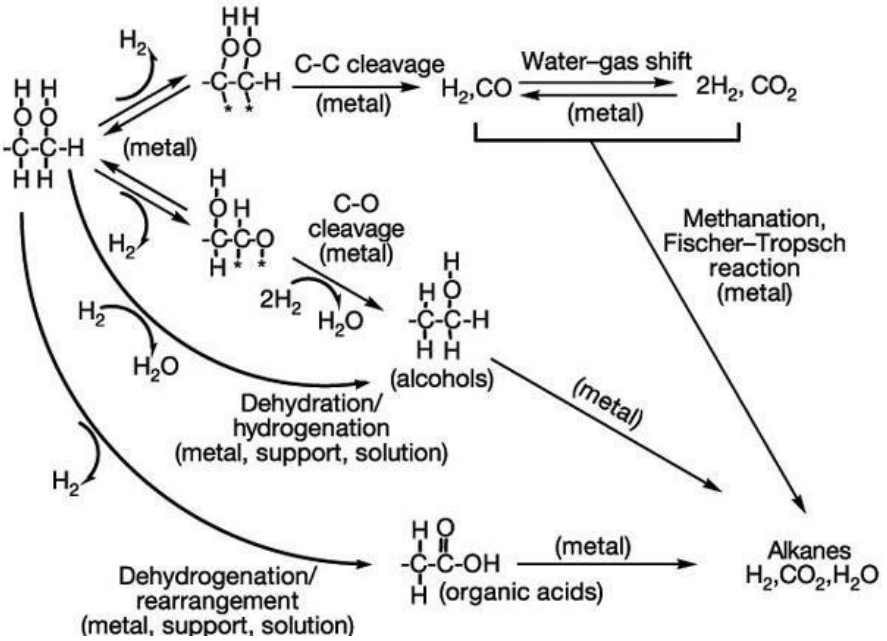
Em um artigo de grande impacto, Cortright et al. [5] propuseram a produção de H2 a partir de hidrocarbonetos oxigenados derivados de biomassa, através de reforma em fase líquida, cujo o esquema reacional pode ser visto na Figura 1.

Dentre os diversos catalisadores testados, os trabalhos de Dumesic e colaboradores revelaram que platina (Pt) suportada em alumina [5] são os melhores para a produção de H2 em fase líquida, a temperaturas em torno de 500 K.

São muitas as vantagens da reação em fase líquida: menor custo energético, pois não é necessária a vaporização da água; redução dos custos dos reatores, devido à baixa pressão operacional e alta densidade do fluido, e maior eficiência na recupe-

ração de calor por troca líquido/líquido. Entretanto, Dumesic e colaboradores não conseguiram obter altas taxas de velocidade na formação de H2 e nem processar cargas com teores de glicerol com mais de 10%

Figura 1 – Rotas reacionais de produção de H2 por reforma de hidrocarbonetos oxigenados em fase líquida [5].

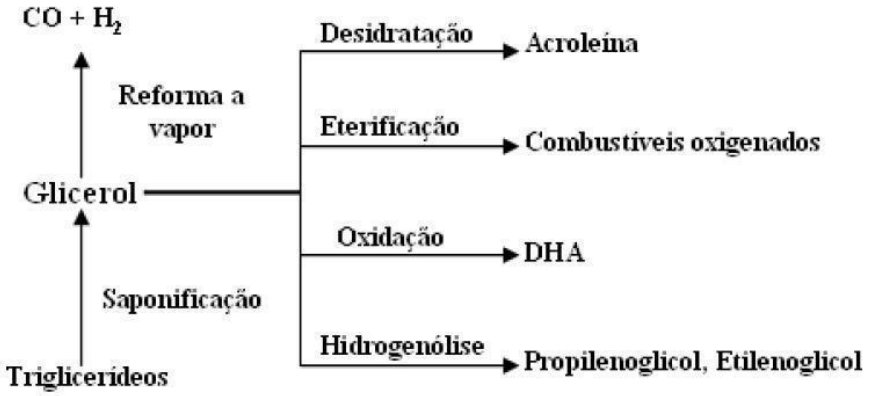


Apesar das pesquisas terem se iniciado considerando como alvo a reforma de etanol, este projeto teve a oportunidade de mapear o cenário energético, buscando também outras possibilidades, uma vez que não é muito econômico se realizar a reforma de um produto já pronto para o uso, como é o caso do etanol. O grande atrativo para a reforma do etanol encontra-se na sua logística definida, superando um importante gargalo para a popularização da economia do hidrogênio. Desta forma, levando-se em consideração a fonte renovável dada pela biomassa e a economicidade nos processos produtivos, inevitavelmente se converge para a utilização de subprodutos e resíduos de processos, que se tornam mais atrativos pelas vantagens que se configuram devido a sua disponibilidade, baixo custo e possibilidades de aplicação.

Neste sentido, o glicerol vem ganhando destaque como uma das moléculas mais promissoras da biomassa para a geração de hidrogênio e outros produtos de alto valor agregado nestes últimos anos, devido à crescente produção de biodiesel e aos trabalhos [6]-[7]. Como alguns exemplos alternativos de aplicação do glicerol citam-se: agregar pela a oxidação seletiva, hidrogenólise seletiva, desidratação, pirólise e reações de reforma, onde se torna possível à obtenção dos mais variados compostos, que vão desde monômeros para confecção de materiais poliméricos,

até combustíveis de alto valor agregado, como diesel e gasolina. A Figura 2 mostra um resumo de algumas das possíveis transformações químicas da glicerina [8].

Figura 2 – Alternativas de rotas para a utilização do glicerol [8].



Várias tecnologias/rotas de produção de hidrogênio utilizando glicerol estão disponíveis. Estas foram abordadas em Relatórios anteriores e serão resumidas na Figura 3.

Figura 3 – Cinética de reações para reforma do glicerol.

Craqueamento: $C_3H_8O_3 \rightarrow 3(CO) + 4H_2$ $\Delta H^0 = 245$ kJ/mol

Oxidação Parcial: $C_3H_8O_3 + 1{,}5(O_2) \rightarrow 3(CO_2) + 4(H_2)$

$\Delta H^0 = -603$ kJ/mol

Reforma a vapor global: $C_3H_8O_3(g) + 3(H_2O) \rightarrow 3(CO_2) + 7H_2$

$\Delta H^0 = 215$ kJ/mol

Reforma em fase líquida: $C_3H_8O_3(l) + 3(H_2O) \rightarrow 3(CO_2) + 7H_2$

$\Delta H^0 = -123$ kJ/mol

Reforma Autotérmica: $C_3H_8O_3 + O_2 + (H_2O) \rightarrow 3(CO_2) + 5H_2$

$\Delta H^0 = -269$ kJ/mol

9.3 Desenvolvimento de Catalisadores [9]

A. Preparação dos catalisadores

As aluminas Catapal A (PP 1688), Degussa (tipo: Carrier 257, carga nº 9430830) e Degussa A (sem especificações), foram calcinadas previamente a 500 ºC por 12 horas com uma taxa de aquecimento de 10ºC/min (Acat5, Adeg5, AdegA5 respectivamente), e posteriormente calcinadas a 900 ºC com uma taxa de aquecimento de 10 ºC/min (Acat9, Adeg9, AdegA9). Os catalisadores de Pt/Al2O3 foram preparados a partir da impregnação seca de 2 % Pt através de uma solução de Pt(NH3)4(NO3)2•xH2O (Strem Chemicals) como precursor. Após a impregnação

os catalisadores preparados foram calcinados a 500 ºC por 4 horas com uma taxa de aquecimento de 10 ºC/min (2%Pt/Al Cat, 2%Pt/Al Deg, 2%Pt/Al Deg A,).

B. Caracterização dos catalisadores

Difração de Raio-X (DRX): As aluminas e os seus respectivos catalisadores foram caracterizados quanto à estrutura cristalina por difratometria de raios X pelo método de pó, em um aparelho Shimadzu, modelo XRD-6000, operando a 30 kV e 15 A. A varredura foi realizada em temperatura ambiente na região 2θ de 5° até 85° com uma contagem de tempo de 4°/min, operando em 40kV e 40 mA, usando radiação Cu-Kα.

Análise de BET: Neste estudo empregou-se a construção de isotermas de adsorção/dessorção de N2 a 77K com o objetivo de determinar a área superficial, tamanho e volume dos poros das aluminas estudadas. Estas análises foram realizadas em um aparelho da Micromeritics, modelo ASAP 2020C. Os resultados foram determinados, ajustando-os ao modelo de isoterma de adsorção de BET.

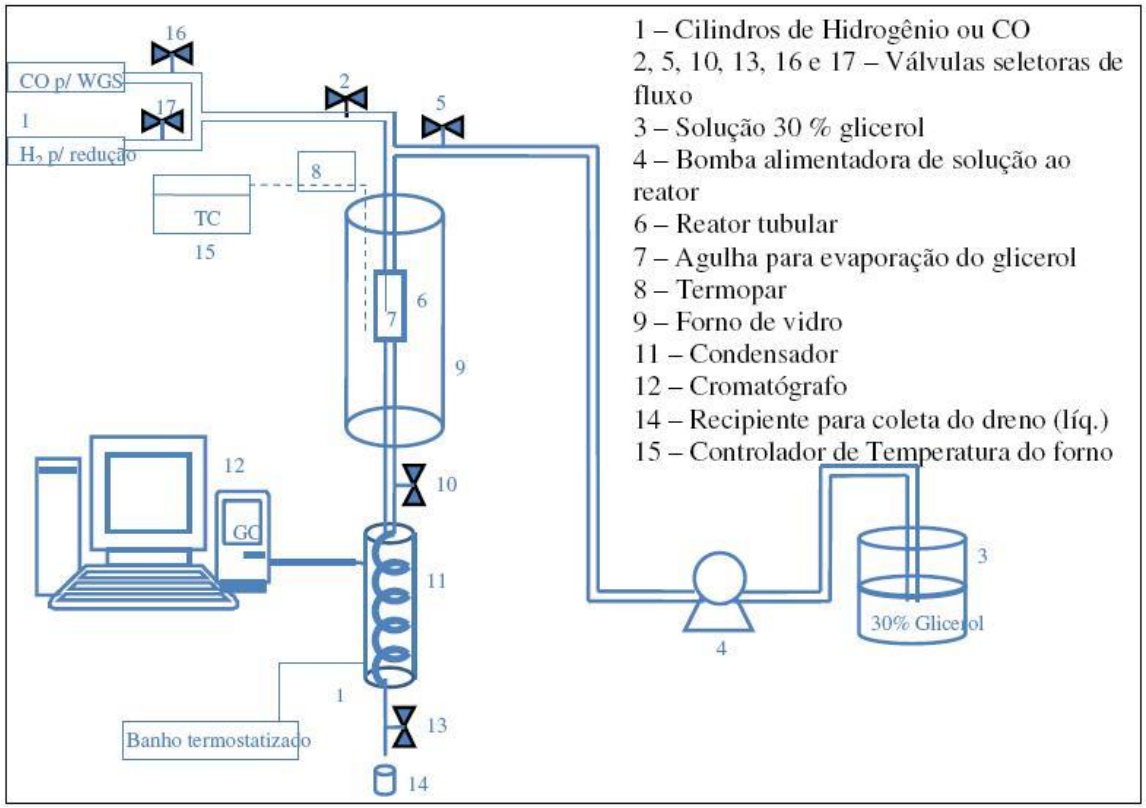
As amostras, aproximadamente 0,5 g de alumina, foram aquecidas até a temperatura de 300°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, onde permaneceram nesta temperatura por 60 minutos. Após este tempo de permanência, fez-se vácuo durante 1 hora. Terminado o vácuo, a análise foi realizada utilizando-se N2 Ultrapuro (99,9%).

Infravermelho com Transformada de Fourier Espectroscopia por reflexão difusa (DRIFTS): Uma amostra de aproximadamente 10 mg foi colocada em uma célula de reação equipada com janelas de ZnSe, onde a mesma foi hermeticamente fechada. As amostras foram reduzidas a um fluxo de 50 mL/min de H2 de 25ºC a 350ºC com uma taxa de aquecimento de 1ºC/min, onde permaneceram por mais 2 horas a 350ºC. O excesso de H2 foi retirado com a passagem de um fluxo de gás inerte (He) por 30 minutos. Fez-se o espectro a 350ºC e depois resfriou-se até a temperatura de 35ºC, onde foi feito um novo espectro. As análises foram feitas em um Infravermelho EQUINOX 55 BRUKER, com um detector MCT. A resolução utilizada foi de 4 cm-1 com 250 varreduras, de 400-4500cm-1. A referência para cada análise foi feita com KBr nas mesmas condições de análise das amostras, exceto com relação ao procedimento de redução.

C. Teste Catalítico: Reforma Gasosa do glicerol.

O sistema utilizado para a Reforma gasosa de glicerol é constituído basicamente por um reator de aço inoxidável acoplado a um condensador e este ao cromatógrafo gasoso. Para melhor compreensão do sistema, a Figura 4 mostra o esquema da unidade.

Figura 4 – Esquema da unidade experimental.



A parte superior do reator é conectada a duas alimentações. Uma alimentação é de solução aquosa de glicerol 30% m/m utilizada como reagente da reação. A outra alimentação é de gás hidrogênio utilizado na redução do catalisador. O aquecimento do reator foi promovido por um forno de vidro conectado a um indicador/programador linear de temperatura. Para leitura da temperatura do sistema foi utilizado um termopar tipo K.

Entre o reator e o cromatógrafo havia um condensador mantido a temperatura de 7°C por um banho termostatizado. A finalidade deste condensador era de recolher todos reagentes e produtos que são líquidos a temperatura ambiente, impedindo que estes chegassem à coluna no estado líquido, podendo então, causar o entupimento da mesma.

As análises dos efluentes gasoso e líquido do reator foram realizadas por dois cromatógrafos de gases da marca Shimadzu modelo GC-17ª ATF versão 3. O cromatógrafo responsável pela análise do efluente gasoso era composto por dois detectores ligados em série: o TCD – Detector de Condutividade Térmica e o FID – Detector de Ionização de Chama. O Argônio foi o gás utilizado como gás de arraste. Uma coluna empacotada Hayesep D foi utilizada na separação dos produtos leves.

Já o cromatógrafo utilizado para a análise do efluente líquido era portador apenas do detector FID. Este cromatógrafo utilizava o gás Hélio como gás de arraste. Uma outra coluna empacotada, Chromosorb 101, também foi utilizada para separação dos produtos líquidos. Este cromatógrafo possuía um sistema de auto injeção de líquidos, que foi utilizado para fazer a análise dos drenos após a reação.

Aos dois cromatógrafos foram conectados micro computadores interfaceados por um módulo de comunicação, da marca Shimadzu modelo CBM-102. A redução do catalisador realizou-se *in-situ* ao reator de aço inoxidável por 12 horas. As 10 primeiras horas de aquecimento obedeceram a uma rampa de 0,50 °C/ min até a temperatura de 350°C, permanecendo nesta mesma temperatura por mais 2 horas. O hidrogênio foi o gás utilizado para redução do catalisador com um fluxo de 35 mL/min. A reação iniciou-se quando a passagem do gás hidrogênio foi interrompida e começou a alimentação da solução aquosa de glicerol 30% m/m pelo reator, utilizando-se de uma bomba Eldex. Aguardou-se 15 minutos para iniciar as análises cromatográficas. As análises foram feitas a cada 45 minutos.

O gás efluente do reator passava pelo condensador para reter os produtos que são líquidos a temperatura ambiente. Aqueles efluentes que mesmo passando pelo condensador a 7°C, permaneciam no estado gasoso, seguiam direto para o cromatógrafo gasoso para serem analisados. Realizou-se esta análise cromatográfica dos produtos gasosos, utilizando-se uma coluna empacotada e os detectores TCD e FID ligados em série. Pelo TCD observaram-se os picos referentes ao H2, CO e CO2. Pelo FID observaram-se os picos referentes a CH4, C2H4, C2H6, C3H6, C3H8.

D. Resultados dos Catalisadores Produzidos

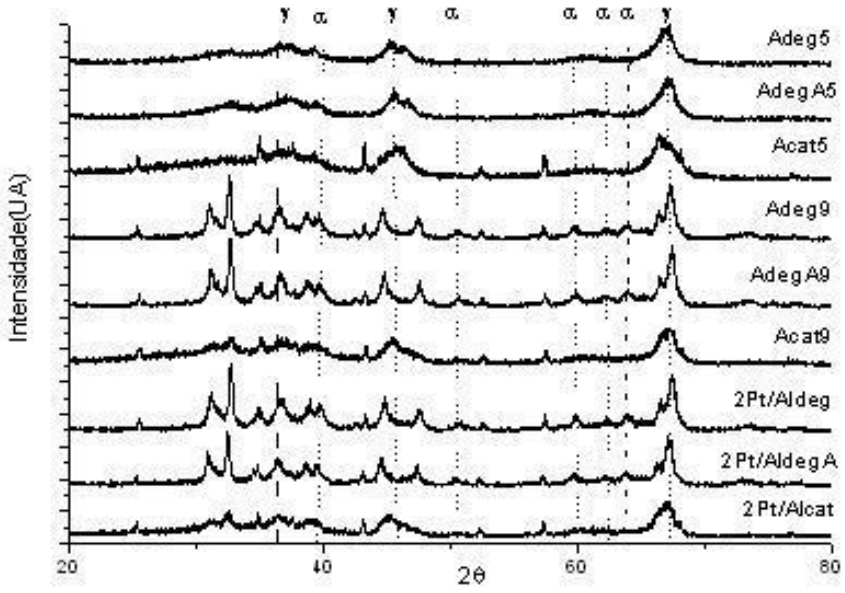
Em geral as aluminas calcinadas a 500ºC exibiram 3 picos principais de maior intensidade em $2\theta = 37{,}6º$, 45,8º e 66,7º que correspondem aos planos (311), (400) e (440), da γ alumina (JSPDS 29-0063). A formação da α alumina é caracterizada pelos picos em 41º, 53 º, 57,5 º e 67º [12]. Nota-se a presença desses picos somente para a Ade-gA900 e 2%Pt/Al DegA, ou seja, nas aluminas calcinadas a 500ºC não ocorreu mudança de fase, enquanto que a calcinação a 900ºC tanto para a AdegA e a Adeg promoveu a mudança de fase para a forma α da alumina. A Figura 5 mostra os difratogramas relacionados às análises das aluminas calcinadas a 500ºC e 900°C com seus respectivos catalisadores preparados.

Os dados obtidos a partir das isotermas de adsorção de BET com relação a área superficial, tamanho e volume dos poros das aluminas utilizadas como suporte são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Resultados de área superficial, volume e tamanho dos poros das aluminas calcinadas a 500 e 900 ºC.

Suportes	BET Área Superficial (m^2/g)	Volume dos poros (cm^3/g)	Tamanho dos poros (nm)
Acat5	166.8681	0.432915	10.37741
AdegA5	115.0482	0.581629	20.22208
Adeg5	123.4082	0.503448	15.70553
Acat9	94.72130	0.361866	15.28132
AdegA9	60.24490	0.389595	25.86742
Adeg9	33.30760	0.177377	21.30167

Figura 5 – Difrato-gramas das aluminas calcinadas a 500 e 900ºC e seus respectivos catalisadores.



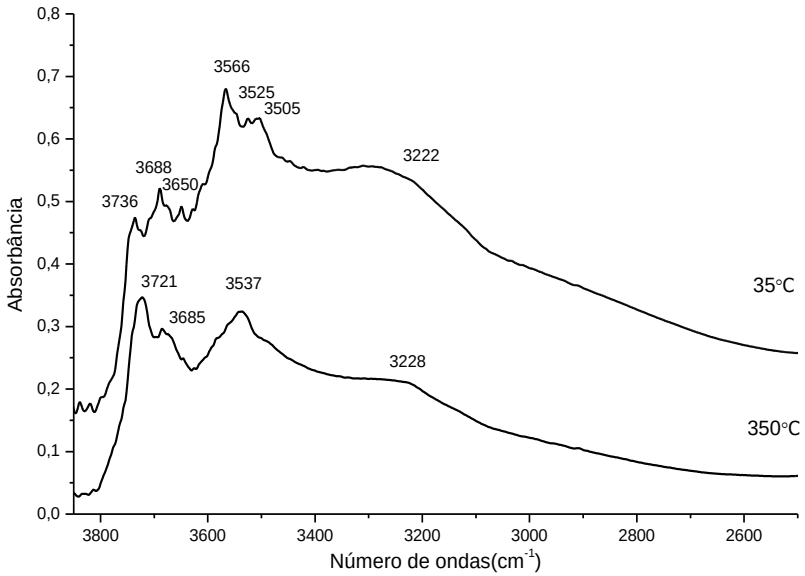
Verifica-se que as aluminas calcinadas a 500ºC apresentaram uma área superficial maior que as aluminas calcinadas a 900ºC. Ocorre um aumento de aproximadamente 50 % em relação ao tamanho de poros, quando as aluminas foram calcinadas a 900ºC, em contrapartida, observa-se uma diminuição do volume dos poros na mesma temperatura de calcinação. Acat5 apresenta a maior área superficial quando comparada a Adeg5 e a AdegA5 calcinadas a 500ºC, o mesmo se observa a 900ºC. A AdegA5 apresentou maior tamanho e volume dos poros quando comparada as Acat5 e a Adeg5. O mesmo comportamento é observado a 900ºC.

Os espectros de DRIFTS a 350 e 35ºC representados nas Figuras 6-11 mostram diferentes bandas de diferentes grupos hidroxilas ao longo do espectro, com bandas associadas a espécies carbonáceas. As bandas em 3656, 3546-3550 e 3465-6477 cm-1 com duplos picos em 3440-3442 e 3427 cm-1 estão associados com os modos de estiramento de OH do tipo Baierita (α Al(OH)3), enquanto que as bandas em 3624-3620, 3527 e 3640 cm-1 com duplos picos em 3396 e 3381-3383 cm-1 são devido a presença de espécies do tipo gipsita (γ Al(OH)3). As bandas demonstradas para os espectros das aluminas indicam uma mistura de espécies gipsita e baierita (isto é, grupos hidroxilas sobre a superfície da alumina que estão na forma cristalina). Os espectros a 35ºC e 350ºC mostram diferenças tanto para as aluminas quanto para os catalisadores, demonstrando mudanças na estrutura das aluminas e dos catalisadores frente ao aumento da temperatura.

Há vários tipos de grupos OH sobre a estrutura da superfície da alumina. Entre estes, os grupos tipo I que estão ligados ao alumínio tetraedricamente (Alt), ou octaedricamente (Alo), grupos tipo II que formam uma ligação entre Alt e Alo ou entre dois átomos de Alo e grupos tipo III ligados a três átomos de Alo. Estas estruturas estão associadas com bandas de absorção na região de 3800-3700 da alumina. As bandas em 3800 e 3780 são atribuídas a absorção de grupos OH tipo I, já as bandas em 3750-3700 e 3700-3635 são relacionadas a absorção dos grupos OH tipo II e III, respectivamente. As aluminas estudadas e os seus respectivos catalisadores apresentam de forma geral grupos OH do tipo II e III. Estes possuem propriedades de aceite de elétrons os quais atuam como sítios ácidos de Lewis e também como íons de oxigênio insaturados coordenados que atuam como sítios básicos de Lewis.

Os resultados da conversão da fase gasosa em função do tempo de reação estão expressos na Figura 12

Figura 6 – Espectro de DRIFTS a 35 e 350ºC da Adeg 9.



Os resultados de DRX comprovam uma tendência na formação de estruturas α da Adeg9, calcinada a 900ºC, o que não se observa quando se compara os difratogramas da Acat9, onde em sua constituição mesmo após calcinação até uma temperatura de 900ºC, não foi suficiente para ocorrer mudança de fase. A alumina α apresenta sítios ácidos de Lewis que neste caso favoreceu a reação de reforma gasosa do glicerol.

Figura 7 – Espectro de DRIFTS a 35 e 350ºC do catalisador 2Pt /Al deg.

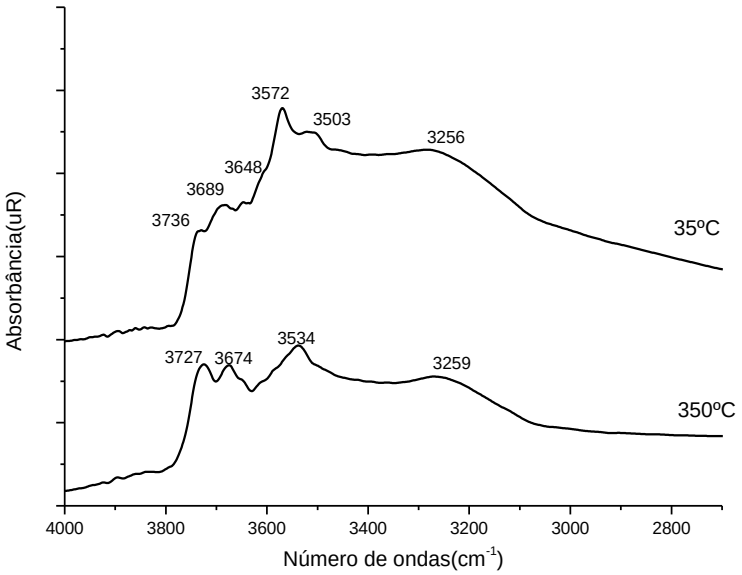


Figura 8 – Espectro de DRIFTS a 35 e 350ºC da AdegA9.

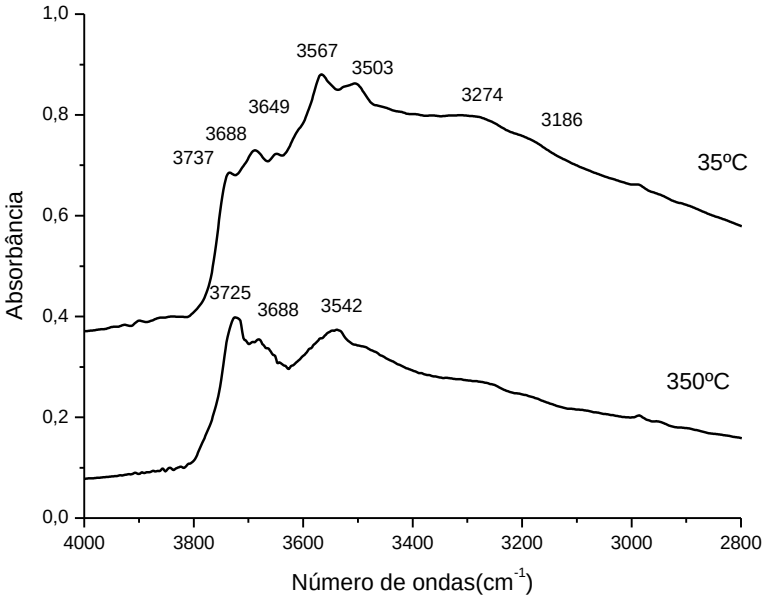


Figura 9 – Espectro de DRIFTS a 35 e 350ºC.do catalisador 2 Pt /Al degA.

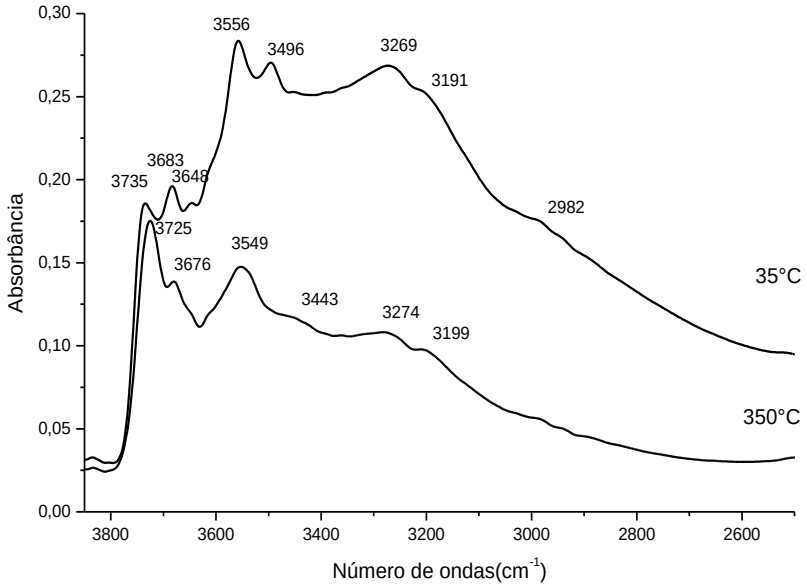


Figura 10 – Espectro de DRIFTS 35 e 350ºC da Acat9.

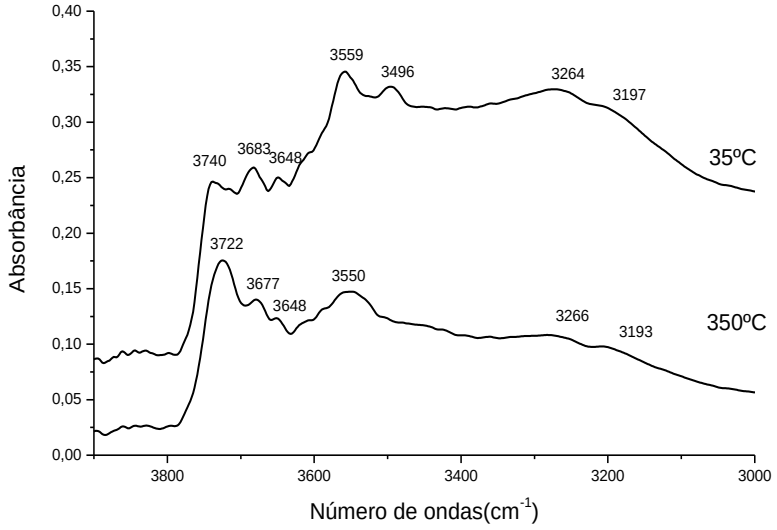


Figura 11 – Espectro de DRIFTS a 35 e 350ºC do catalisador 2 Pt /Al cat.

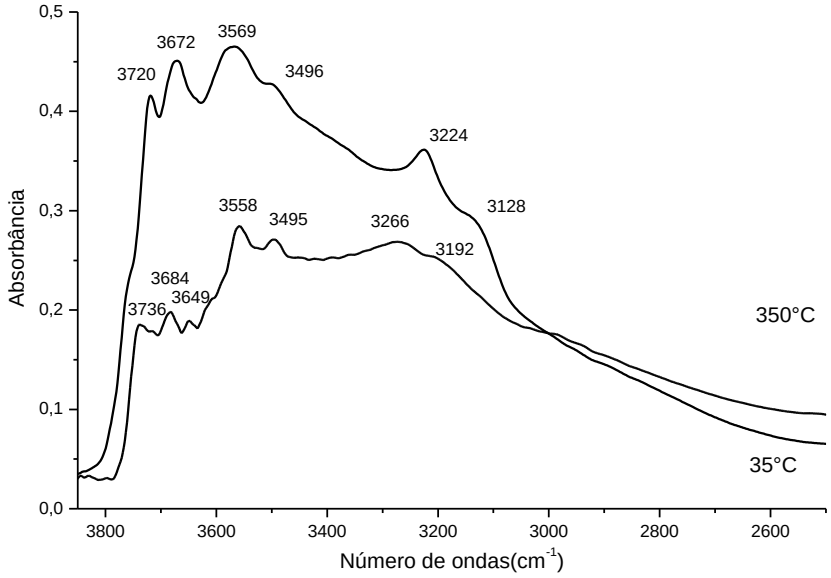
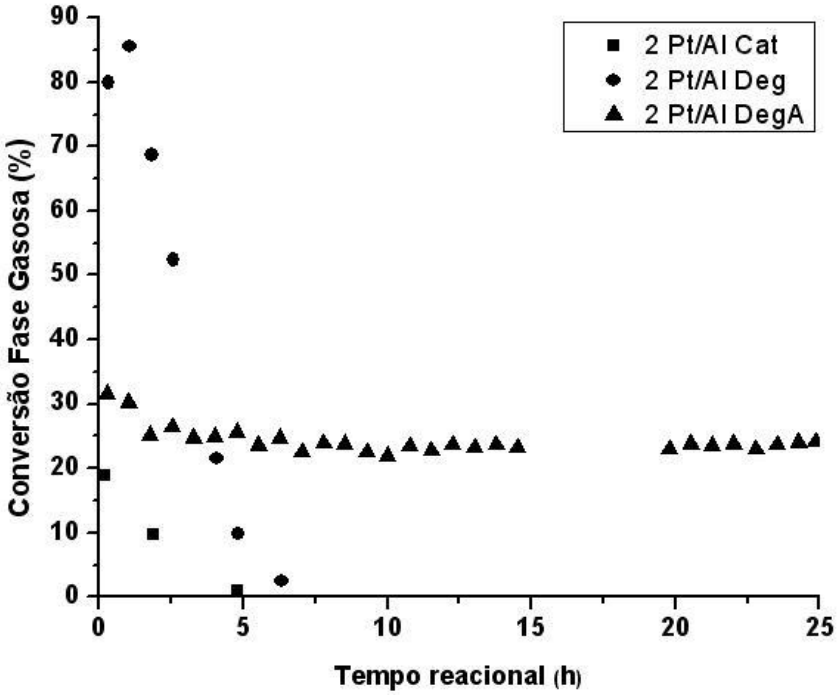


Figura 12 – Conversão em fase gasosa em função do tempo de reação.



Os resultados de BET demonstram que para esta reação, a área superficial do suporte não influenciou o desenvolvimento reacional, pois mesmo Acat tendo uma área superficial maior que a Adeg, o resultado para a reação de reforma do glicerol não foi favorecido, utilizando a Acat como suporte do catalisador 2Pt/Alcat. Pode-se observar então que quanto maior o tamanho e volume dos poros mais a reação será favorecida.

Acredita-se que o bom desempenho do catalisador 2Pt/AldegA esteja relacionado a presença da forma estrutural da alumina α, que apresenta uma maior quantidade de sítios ácidos de Lewis, o que favorece a quebra de ligações C-C como pode ser constatado através da alta seletividade da fase gasosa para a reação de reforma gasosa do glicerol. Estas modificações estruturais podem ser evidenciadas pelo difratograma de raio X e confirmado pelos espectros de DRIFTS.

Os valores de conversão da fase gasosa obtidos nas primeiras 25 horas tiveram um comportamento tendendo a linearidade, mostrando boa estabilidade quando se utilizou o catalisador 2 Pt/Al deg A. Em contrapartida os catalisadores 2 Pt/Al deg e 2 Pt/Alcat apresentaram desativação nas primeiras 6 e 5 horas de reação, respectivamente, o que possivelmente poderia estar relacionado com diferenças na acidez dos suportes.

Durante o período de realização destes trabalhos, diversos catalisadores foram produzidos através das técnicas de impregnação seca e impregnação úmida, utilizando diferentes aluminas comerciais, submetidas a diferentes tratamentos térmicos, e dois precursores metálicos. Os resultados mostraram que o catalisador produzido através de impregnação úmida e utilizando o ácido hexacloroplatínico como precursor metálico e a alumina Vetek-S calcinada a 1100 °C por 3 horas, foi a que apresentou maior estabilidade, com conversão gasosa superior a 10 % por mais de 30 horas. Os resultados preliminares de caracterização dos catalisadores sugerem uma relação entre a presença de grupos hidroxilas e a desativação do catalisador, e que tais grupos podem ser minimizados por uma maior temperatura de calcinação. Também foi observado que o pH da solução de glicerina deve ser controlado para evitar a desativação do catalisador devido a maior formação de coque. O sistema testado para a reforma da glicerina mostrou-se muito promissor como uma alternativa para este rejeito da produção do biodiesel, e novos experimentos seriam de grande interesse na busca de novas rotas para aproveitamento desta substancia [10].

9.4 Potencial Técnico-Econômico [11]

O Simulador Aspen Plus (Aspen Technology, Inc. USA) foi usado para definir, estruturar, especificar e similar os esquemas de conversão do glicerol. Os custos econômicos, de capital e de operação foram calculados usando o *software* Aspen Icarus Process Evaluator (Aspen Technology, Inc. USA). Vale ressaltar que propriedades de alguns componentes específicos, não presentes nos *software*s, foram adicionadas mediante sub-rotinas e de outras fontes.

Os parâmetros econômicos considerados foram àqueles observados na América Latina (média), em dólares americanos USD, para um período de 10 anos a uma taxa de juros anual de 15%, considerando um método de depreciação linear com 30% de imposto. O custo de trabalho (*labor cost*) para operadores e supervisores foi de US$ 2,1/h e US$ 4,3/h, respectivamente. Os custos usados para eletricidade, água, pressão de vapor foram de US$ 0,003/kWh, US$ 1,3/m3 e US$ 8,2/ton, respectivamente. A Tabela 2 apresenta os parâmetros para a simulação.

Uma vez obtida a análise econômica do processo de purificação, passamos a analisar o processo de conversão do glicerol a hidrogênio, considerando uma etapa composta de reforma: $C3H8O3(g) + 3(H2O) \rightarrow 3(CO2) + 7H2$. O esquema reacional utilizado é ilustrado na Figura 13. Na Tabela 3 são apresentados os resultados desta análise.

Tabela 2 – Composição do glicerol alimentado, fluxo mássico de glicerol purificado e custos da purificação.

Entrada (kg/h)	Fluxo Mássico (kg/h)				Custo Purificação (US$/L)(#)		
Glicerol Bruto (*)	Metanol	Glicerol (88%)	Glicerol (98%)	Glicerol (99,7%)	Glicerol (88%)	Glicerol (98%)	Glicerol (99,7%)
973,3	301,98	665,25	596,60	586,18	0,16	0,20	0,28

(*): 2% de Triglicerídeos, 32,6% de metanol, 60% de glicerol, 2,6% de catalisador de Na, 0,13% proteínas e 2% de ácidos graxos.

(#) Metanol é considerado como um co-produto da purificação, possuindo valor agregado

Figura 13 – Esquema reacional para análise econômica.

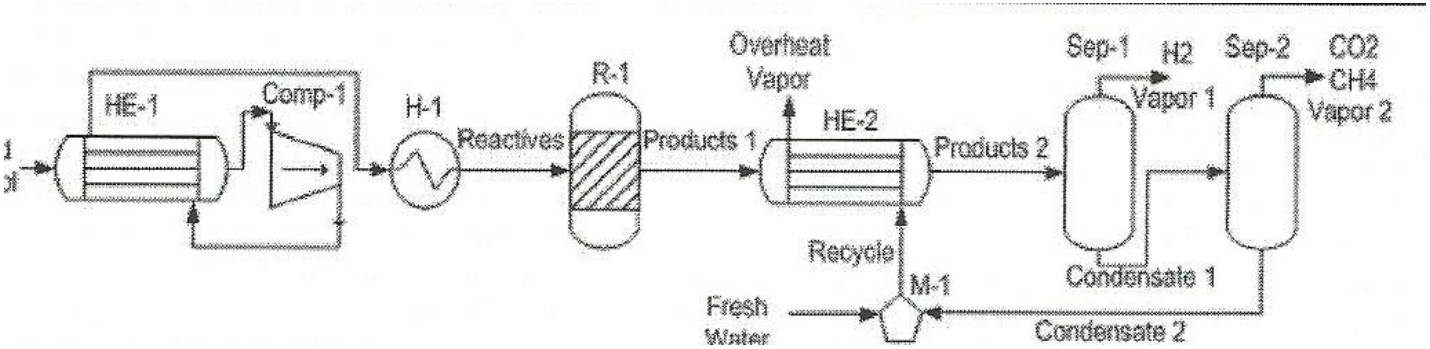
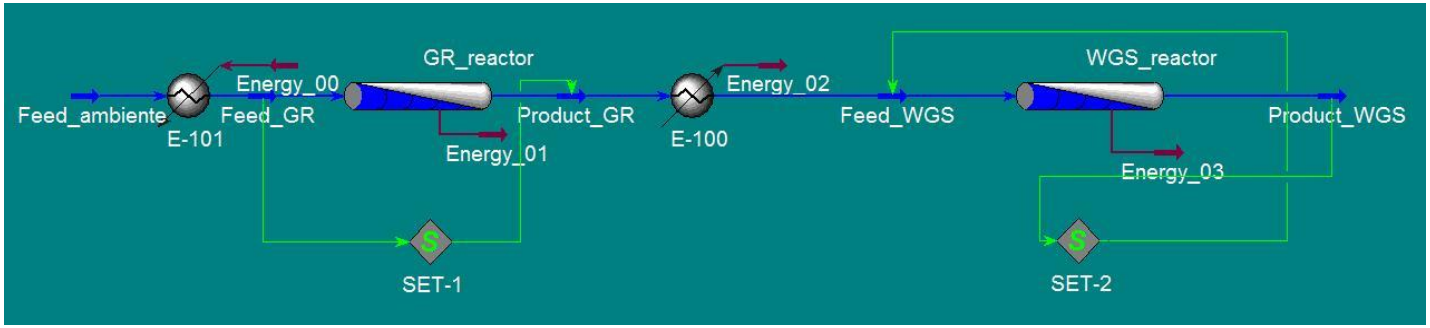


Tabela 3 – Resultados da análise econômica do processo.

Glicerol 10%, entrada (kg/h)	H_2O, entrada (kg/h)	H_2 produzido a 91 % peso (kg/h)	Gás de Síntese produzido (kg/h)	Rendimento molar a H_2	Razão Preço Comercial de Venda / Custo Total de Produção	% do Custo		
						Depreciação do equipamento	Matéria-Prima	Serviços
100,0	30	1,0	20,7	78,2	1,05	45,14	15,75	20,17

Figura 14 – Esquemático para simulação do novo protótipo de reformador.



Em que:

Feed_ambiente = solução de glicerol alimentada a 25 ºC e 1 bar.
E-101 – Aquecedor da solução de alimentação.
Energy_00 – corrente de energia necessária para aquecer a alimentação até a temperatura do reator.
Feed_GR – alimentação do reator de reforma.
GR_reactor – reator de reforma de glicerol.
Energy_01 – corrente de energia necessária para manter constante a temperatura do reator de reforma.
Product_GR – corrente de produtos na saída do reator de reforma.
E-101 – Resfriador da corrente de produto do reator de reforma.
Energy_02 – corrente de energia necessária para resfriar a corrente de saída do reator de reforma até a temperatura do reator *Water Gas Shift* (WGS).
Feed_WGS – corrente de alimentação do reator WGS.
WGS_reactor – reator da reação *Water Gas Shift.*
Engergy_03 – corrente de energia necessária para manter a temperature do reator WGS constante.
Product_WGS – corrente de produto do reator WGS.

Tabela 4 – Fração molar dos diferentes componentes na saída dos reatores de reforma e de WGS em função da composição de glicerol na corrente de alimentação. Alimentação de 2 kg/h de solução.

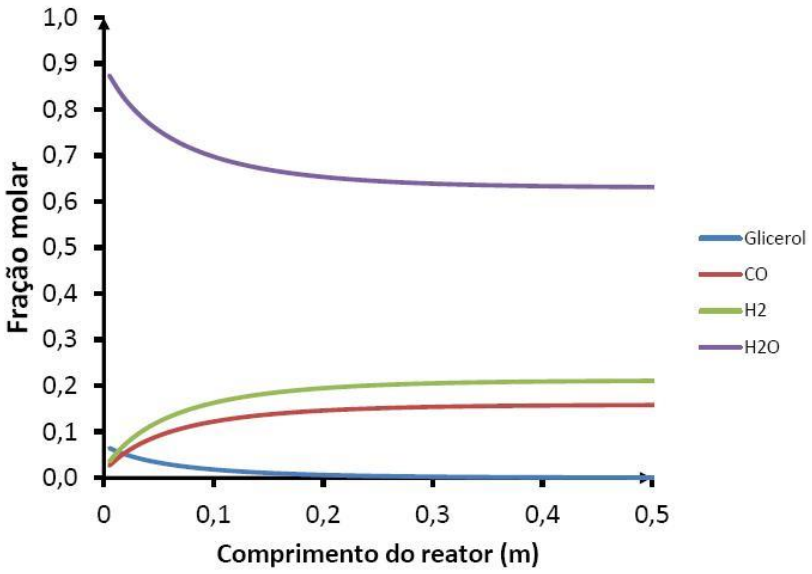
	Alimentação 30 % glicerol		Alimentação 20 % glicerol		Alimentação 10 % glicerol	
	Fração molar reator de reforma	Fração molar reator WGS	Fração molar reator de reforma	Fração molar reator WGS	Fração molar reator de reforma	Fração molar reator WGS
glicerol	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
CO	0,1579	0,0000	0,1088	0,0000	0,0564	0,0000
H_2	0,2105	0,3683	0,1451	0,2540	0,0752	0,1315
H_2O	0,6313	0,4735	0,7458	0,6370	0,8684	0,8120
CO_2	0,0000	0,1579	0,0000	0,1088	0,0000	0,0564

Tabela 5 – Vazão mássica dos diferentes componentes na saída dos reatores de reforma e de WGS em função da composição de glicerol na corrente de alimentação. Alimentação de 2 kg/h de solução.

	Alimentação 30 % glicerol		Alimentação 20 % glicerol		Alimentação 10 % glicerol	
	Vazão mássica reator de reforma (kg/h)	Fração molar reator WGS (kg/h)	Vazão mássica reator de reforma (kg/h)	Fração molar reator WGS (kg/h)	Vazão mássica reator de reforma (kg/h)	Fração molar reator WGS (kg/h)
glicerol	0,0040	0,0040	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010
CO	0,5440	0,0000	0,3630	0,0000	0,1820	0,0000
H_2	0,0520	0,0910	0,0350	0,0610	0,0170	0,0310
H_2O	1,4000	1,0500	1,6000	1,3670	1,8000	1,6830
CO_2	0,0000	0,8550	0,0000	0,5700	0,0000	0,2850

Na Figura 15 é apresentado o resultado de simulação para a reforma do glicerol.

Figura 15 – Fração molar das diferentes espécies químicas ao longo do reator de reforma de glicerol. A conversão de glicerol ao final do reator é de 99 %.



Parâmetros do reator de reforma:

Comprimento = 0,5 m

Diâmetro interno = 0,05 m

Porosidade = 0,4

Catalisador: Pt/C 5 %

Parâmetros do leito catalítico:

Diâmetro do catalisador = 0,005 m

Esfericidade = 0,96

Densidade do catalisador = 835 kg/m3

Densidade bulk = 501 kg/m3

Equação da taxa para a reação de reforma (1):

$$-r_G = k[C_G] \quad com \quad k = Aexp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{01}$$

Com:

A=2,906x106 h-1

Ea= 22199J/mol

$\lfloor C_G \rfloor$ =Concentração de glycerol em mol/cm3

Equação da taxa para a reação de WGS (2):

$$-r_G = k\left(P_{CO}.P_{H_2O} - \frac{P_{CO_2}.P_{H_2}}{K_e}\right) \quad (02)$$

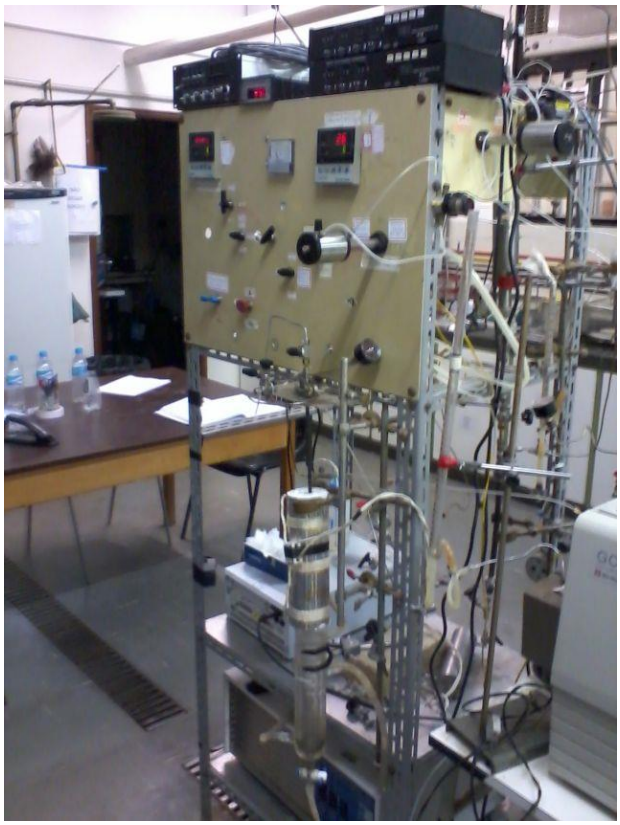
Com:

A=1,48x105mol/h.atm^2

Ea=47,4kJ/mol

Na Figura 16 é apresentada uma fotografia dos laboratórios de cinética e catalise química da Universidade Federal de Uberlândia e do protótipo de sistema de reforma de glicerol construído para a pesquisa deste projeto.

Figura 16 – Laboratório da UFU e o protótipo de reformador de glicerol.



9.5 Conclusões

Este projeto desenvolveu catalisadores para reforma de biomassa. Neste caso, a biomassa utilizada foi a residual do processo de produção de biodiesel, o glicerol. Trata-se de uma oportunidade de se produzir hidrogênio com fins energéticos e como insumo químico.

Os catalisadores foram pesquisados, sintetizados, testados e analisados e os resultados comprovam os bons resultados da pesquisa. Foram apresentados os resultados para o catalisador de platina suportado em alumina.

Foi desenvolvida uma modelagem econômica do processo e feitas simulações para um protótipo de maior escala.

Entretanto, cabe ressaltar que decorrente da pesquisa também é possível verificar que se trata apenas do início de uma pesquisa na direção de um produto comercial para catalise de reforma de glicerol. De fato, somente através de pesquisa básica, como esta, é possível entender o universo da pesquisa e o contexto da tecnologia associada. Como grande conclusão temos que a elaboração de catalisadores não é nem um processo simples e nem fácil.

A Universidade Federal de Uberlândia se beneficiou do projeto na medida em que pode equipar seus laboratórios, construir protótipos, que ao final da pesquisa permanecerão na instituição, possibilitando o desenvolvimento de novas pesquisas e também na contribuição ao reconhecimento de sua competência técnica no assunto objeto do projeto e na formação de recursos humanos especializados.

Já a concessionária de energia, Cemig, pode acompanhar mais de perto os desenvolvimentos da pesquisa, entendendo a sua complexidade e ao mesmo tempo, reunindo informações e conhecimento para subsidiar posicionamento estratégico da Empresa frente aos desafios das tecnologias de produção e uso de hidrogênio como vetor energético, bem com sobre tecnologias de alternativas energéticas.

O setor elétrico tem a possiblidade de desenvolvimentos de novas formas de atendimento ao consumidor e por fim, a sociedade se beneficia por utilização de formas de energia mais amigáveis ao meio ambiente e de caráter renovável.

Como sugestão para trabalhos futuros cita-se: o desenvolvimento de protótipos em maior escala e que também integram tanto a produção de energéticos na forma química, quanto eletricidade, com possibilidade de se alimentar comunidades isoladas.

Capítulo 10

Capítulo 10: Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W[10]

***Resumo*- Os sistemas de energia cada vez mais estão se direcionando para fontes renováveis e usos com baixas emissões e eficientes, por opções tecnológicas ou por pressão da sociedade. Dentro desse direcionamento as tecnologias associadas com o hidrogênio merecem destaque por atender a vários requisitos desejáveis para os sistemas energéticos. As células a combustível são equipamento onde é gerada a energia elétrica usando hidrogênio. O tipo de célula SOFC, constituído de material cerâmico e que opera a alta temperatura se mostra promissor para sistemas de geração distribuída. Este artigo apresenta o desenvolvimento do P&D Cemig/Aneel 097, que trata do desenvolvimento de um protótipo de célula tipo SOFC de 50 W. São apresentadas as atividades e procedimentos desenvolvidos, bem como as dificuldades e principais resultados obtidos.**

10.1 Introdução

Acompanhando o balanço energético nacional [1] percebe-se um aumento crescente na demanda de energia. Este aumento possui intensa relação com a atividade econômica, e muito mais que bens e serviços produzidos pela energia, pode também indicar a popularização tecnológica, atingindo cada vez a um público maior e neste caso, gerando uma melhoria na qualidade de vida da população.

O desafio de suprir a demanda futura com energia renovável, ambientalmente correta, economicamente viável, socialmente aceitável tem se mostrado de difícil solução. São muitas as restrições impostas pelos processos ou pela sociedade, reduzindo significativamente o universo para obtenção de uma solução satisfatória.

Uma das maneiras mais modernas e utilizadas no mundo para conter a expansão do consumo sem comprometer a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico tem sido o uso eficiente [2]. A eficiência energética tem se mostrado de grande importância, a fim de se evitar demanda pela atualização tecnológica do processo, por ações educativas, investimento em equipamentos e instalações afim de minimização das perdas nos processos. Neste caso, sistemas energeticamente eficientes representam uma oportunidade de reflexão sobre o aquecimento global e escassez de combustíveis [3].

Os sistemas de geração distribuída (GD) se caracterizam principalmente pela geração próxima ao local de consumo. As tecnologias de GD vêm se tornando cada vez mais presentes no setor elétrico mundial, com importantes tendências, como por exemplo, as redes inteligentes, chamadas de *smartgrid*. Dentre as principais

[10] SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V. ; CARVALHO, A. M. ; DOMINGUES, R. Z.. Publicado em VI - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Ctenel, 2011, Fortaleza.

tecnologias aplicáveis à geração distribuída de energia destacam-se: as células a combustível, as microturbinas a gás, os motores de combustão interna de baixa emissão, os motores Stirling e os painéis fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas, as termelétricas solares, as eólicas e a cogeração. Pelo fato de serem tecnologias de produção de energia local, é esperada uma redução de custo, uma vez que não é necessária grande infraestrutura de transmissão e distribuição e são reduzidas as perdas por transporte.

As redes inteligentes são apoiadas nas tecnologias de geração local e de geração distribuídas, bem como agrega filosofias de operação associadas com a rede mundial de computadores e nos conceitos de inteligência artificial de forma a agregar serviços ao sistema elétrico, possibilitando ao consumidor melhores condições de gerenciamento e uso eficiente de energia. Nesse cenário futuro, as células a combustível, principalmente as do tipo óxido sólido, que trabalham em alta temperatura e possibilitam a cogeração, se mostram bastante atraentes, principalmente considerando-se os benefícios esperados.

A Cemig vem investindo em projetos de utilização de fontes de energia renováveis, com destaque para biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, energia solar e geração eólio-elétrica e adicionalmente, tem investido em projetos de uso racional da energia, cogeração e geração distribuída [4]. Atenta às oportunidades que podem advir da tecnologia das células a combustível a empresa desenvolve desde 2000, projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) podendo-se citar: a produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e por reforma de etanol, o protótipo de célula a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) e do tipo SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*).

As células a combustível são equipamentos onde ocorre uma reação eletroquímica entre o hidrogênio, que pode ser puro ou em mistura gasosa, e o oxigênio, resultando em energia elétrica, calor e vapor de água como produtos. As SOFC possuem como particularidades principais a composição baseada em materiais cerâmicos e a operação em alta temperatura (700-1000º C). Essa condição de temperatura abre a possibilidade para a reforma interna, ou seja, o hidrogênio é gerado de outros combustíveis e desta forma não necessita ser produzido, eliminando importantes gargalos tecnológicos e econômicos associados com a produção e armazenamento de gás hidrogênio. Outra vantagem deste sistema é a possibilidade de geração de calor simultaneamente com energia em sistemas de cogeração ou mesmo tri-geração, caso o sistema de exaustão da célula seja acoplado a um chiller de absorção, por exemplo. Estes projetos têm sido pesquisados pela Cemig dentro do P&D 237 - Avaliação teórico-experimental da gaseificação de biomassa para o acionamento de células a combustível de óxido sólido [5].

As SOFC representam uma nova opção de suprimento descentralizado de energia elétrica alinhadas com a visão de futuro da Cemig e do setor elétrico [6].

A seção 10.2 apresenta de forma breve o projeto de desenvolvimento de um protótipo de SOFC. A seção 10.3 mostra o laboratório de materiais e pilhas a combustí-

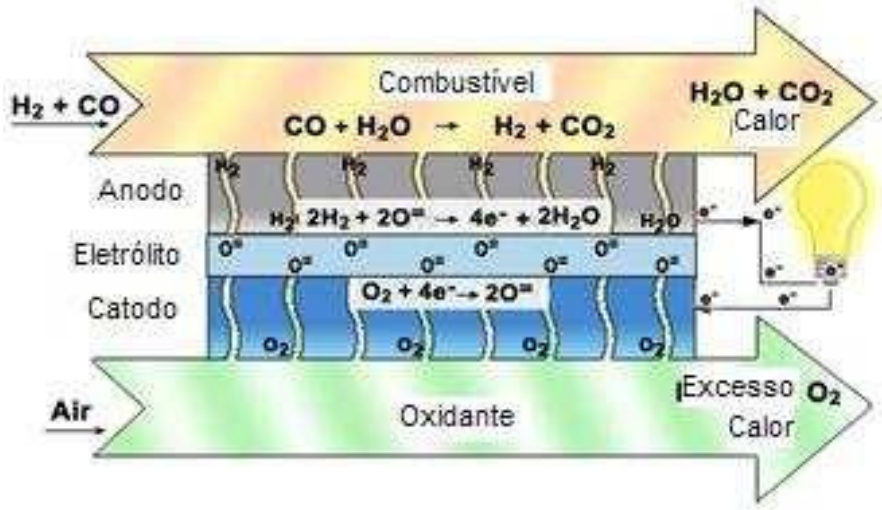
vel (LaMPaC), importante instalação onde foi desenvolvido de forma pioneira no Brasil o empilhamento de células unitárias deste tipo de célula a combustível. Na seção 10.4 encontram-se os resultados e principais discussões decorrentes da execução desta pesquisa. As conclusões do trabalho encontram-se na seção 10.5 e no encerramento do trabalho estão as referências bibliográficas para a elaboração deste artigo.

10.2 P&D CEMIG/ANEEL Nº 097

A. SOFC: descrição básica

A Figura 1 ilustra o funcionamento de uma SOFC, inclusive indicando as reações que ocorrem no sistema. Do lado catódico, o comburente é reduzido e do lado anódico o combustível é oxidado.

Figura 1 – LaMPaC na UFMG.



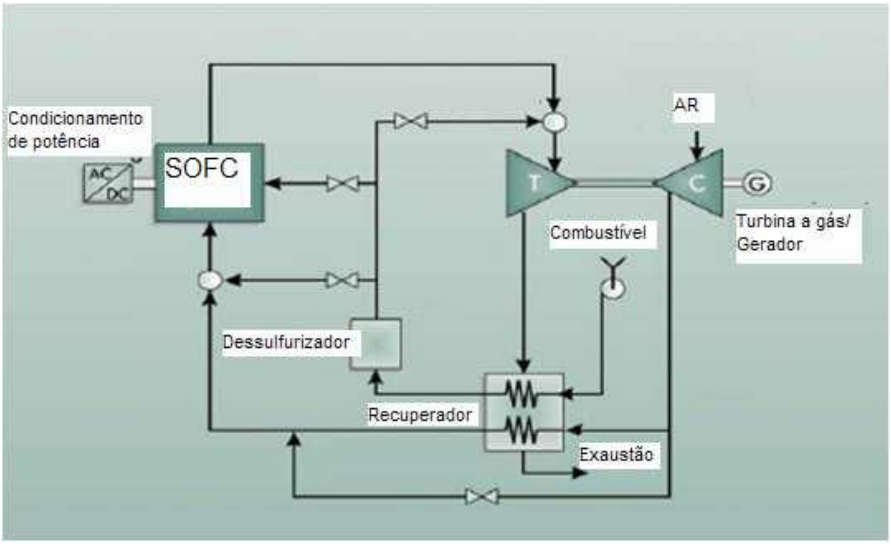
O rendimento dessa reação não é 100%, uma parte da entalpia livre da reação é liberada na forma de calor, permitindo, no caso das células de alta temperatura, como é o caso da SOFC, manter a temperatura de funcionamento da célula. A diferença de potencial (ddp) que existe entre os eletrodos da célula em funcionamento é devida aos elétrons fornecidos pelo anodo e os elétrons consumidos no catodo. A ddp teórica entre um eletrodo de oxigênio e um eletrodo de hidrogênio é de 1,23 V em circuito aberto a 298 K, no entanto, em circuito fechado este potencial diminui devido aos efeitos relacionados com a cinética das reações eletroquímicas e às perdas de natureza ôhmica [7].

A composição mais adequada para o eletrólito é a zircônia estabilizada com ítria (YSZ) na proporção. Tal material trata-se de um condutor puramente iônico numa

faixa ampla de pressão parcial do oxigênio e por apresentar coeficiente térmico de dilatação mais próxima aos componentes adjacentes. Para o anodo, o material mais utilizado é um compósito formado a partir de óxido de níquel (NiO) com o material usado no eletrólito. Já no caso do catodo, são usados eletrodos compostos por manganitas de lantânio dopadas com estrôncio (LSM). Encerrando os principais componentes das células encontram-se as placas bipolares, responsáveis pela condução eletrônica, que devem ser química, morfológica e mecanicamente estáveis nas condições de oxidação e de redução. A utilização de interconectores na forma metálica ou de ligas pode diminuir o custo de produção, se tornando um fator relevante para a viabilidade econômica destes equipamentos. Os materiais mais utilizados são: aços inoxidáveis (ferríticos e austeníticos) e, ligas a base de níquel da série Inconel® e Crofer 22 – APU.

Este tipo de célula a combustível não usa metais nobres, a exemplo a célula tipo PEM que usa platina ou ligas com esse metal, devido o trabalho em alta temperatura, preferencialmente acima de 700º C. Tal condição leva a uma redução de custo da matéria-prima por um lado e a um aumento de custo associado com a condição de trabalho. A eficiência deste sistema é elevada, atingindo a ordem de 60% [8], uma vez que as condições de operação possibilitam a produção de calor, que pode ser usado para a cogeração ou aplicações em ciclo combinado. A Figura 2 mostra uma configuração para essa aplicação.

Figura 2 – Esquema simplificado de cogeração com SOFC.



Além disso, as SOFC são relativamente inertes e estáveis frente ao manuseio e corrosividade dos materiais, possuem emissões extremamente baixas e o perigo de eliminação de CO no gás de exaustão é eliminado uma vez que todo CO produzido é convertido em CO2 nas altas temperaturas de operação. Tais equipamentos têm uma expectativa de vida acima de 40000 h - 80000 h. Entretanto trata-se de uma tecnologia com dificuldades operacionais devido a problemas como o da estanqueidade aos gases.

Dentre as empresas e instituições que pesquisaram ou ainda desenvolvem esta tecnologia, pode-se citar: Westinghouse, NEDO (*New Energy Development Organization*), Honeywell, Siemens e a Fuji Electric, Ceramic Fuel Cells Limited, Ztek, Sulzer Hexis, ECN (*Energyonderzoek Centrum Nederland*), Rolls-Royce, CEA (*Commissariat à l'Énergy Atomique*), ECN e DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, Alemanha), universidade de Keele (Reino Unido), pelo centro de Jülich (Alemanha) e pelos laboratórios franceses LEPMI (*Laboratoire d'Electrochimie et Physicochimie des Matériaux et des Interfaces*), LACE (*Laboratoire de l'Application de la Chimie à l'Environnement*), LCMI (*Laboratoire de Chimie Inorganique de Toulouse*) e ICMB (*Institut de Chimie et de la Matière condensée de Borde-aux*).

Pode-se afirmar que as SOFC de tecnologia planar estão em estágio de desenvolvimento mais ou menos avançado em todo o mundo, pois mesmo os produtos que começam a entrar no mercado tratam-se de protótipos refinados e não de produtos comerciais. Uma grande expectativa comercial foi o anúncio da empresa Siemens de uma unidade de 250 kW para 2009.

No Brasil existem trabalhos isolados de pesquisa e desenvolvimento em diferentes estágios tecnológicos. Dentre os trabalhos realizados merecem destaque os realizados: na UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) na área de produção e caracterização de eletrólitos e catodos, de medidas elétricas e eletroquímicas dos mesmos e de suas interfaces; na UNESP (Universidade do Estado de São Paulo) na produção de catodos e ensaios elétricos de célula unitária e no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) na produção de eletrólito. Este ano foi lançado o Programa Brasileiro de Células a Combustível. Este programa pretende criar condições para o desenvolvimento de uma tecnologia nacional em sistemas energéticos baseados em pilhas a combustível e para o estabelecimento de uma indústria nacional para produção destes sistemas, além de incentivar a instalação dos mesmos. Investimentos deste programa no desenvolvimento das SOFC de tecnologia planar estão previstos no âmbito da Rede de Células a Combustível e Eletroquímica.

B. O Projeto

No Brasil são limitadas e mesmo inexistentes a experiência na produção, instalação e operação de pilhas a combustível de altas temperaturas, principalmente no que se refere às tecnologias de pilhas a base de óxidos sólidos. Mais raros ainda são os grupos de pesquisa que possuem trabalho de desenvolvimento neste tipo de

tecnologia. As SOFC são os mais eficientes (quantidade de combustível consumida / quantidade de energia gerada) geradores de eletricidade do tipo pilha a combustível em desenvolvimento no mundo, permitindo um uso flexível de combustíveis como os alcanos leves, o hidrogênio e principalmente o gás natural. A tecnologia das SOFC é muito adequada para aplicações no mercado de geração estacionária de potência, porque a sua elevada eficiência de conversão fornece grandes benefícios quando o custo do combustível é elevado devido às dificuldades de entrega. São construídas em módulos e inteiramente em estado sólido, podendo ser elaboradas para atender demandas de potência específicas às necessidades. São, também, suficientemente silenciosas para instalação em casas.

A tecnologia envolvida no desenvolvimento de células de alta temperatura é bastante complexa e demanda trabalhos interdisciplinares (várias áreas da engenharia e das ciências básicas, como a química e a física). Esta diversidade indica ao mesmo tempo as dificuldades e os significativos ganhos científicos e tecnológicos que um projeto neste tema possa trazer. Este projeto prevê o desenvolvimento dos processos de sínteses e processamentos cerâmicos de materiais visando a montagem, operação e otimização de células unitárias de óxido sólido que culminará na elaboração de um protótipo operacional estacionário de 50 W. Este se trata um marco na nacionalização e desenvolvimento de tecnologia em pilhas a combustível de alta temperatura.

O P&D CEMIG/ANEEL 097 se iniciou no ciclo 2002/2003, com previsão de duração de 48 meses e foi encerrado em Junho/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Distribuição SA e o Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais (DQ/UFMG). Seus principais objetivos foram [9]:

- Desenvolver tecnologia nacional de produção de sistemas modulares de células a combustível de óxidos sólidos (do tipo SOFC), sendo proposta como meta final produzir um protótipo de 50 W;

Como objetivos específicos a serem atingidos no desenvolvimento deste projeto de pesquisa pode-se citar:

- Desenvolver tecnologia nacional para síntese, conformação e sinterização de sistemas cerâmicos destinados à elaboração das células unitárias;
- Projetar e desenvolver placas bipolares para distribuição de gases e interconexão das células unitárias;
- Desenvolver tecnologia nacional para pré-aquecimento e partida das células e do protótipo de SOFC;
- Implementar os sistemas de segurança para trabalho com as células unitárias e com o protótipo de SOFC;
- Desenvolver sistemas periféricos de testes elétricos do protótipo de SOFC, visando a avaliação do desempenho e otimização do mesmo;

- Testar e caracterizar as meia-células, as células unitárias e o protótipo de SOFC;
- Montar um protótipo de pilha a combustível do tipo SOFC de 50 W.

C. Metodologia

A metodologia executada para se atingir o objetivo do projeto é apresentada a seguir:

- Ampla revisão bibliográfica sobre o assunto de células a combustível do tipo SOFC [8];
- Formação da equipe e planejamento da pesquisa [10];
- Adequação do laboratório para a pesquisa;
- Projeto de construção do DHCEL – Dispositivo Hospedeiro da Célula;
- Projeto e construção do LaMPaC;
- Elaboração e montagem de célula unitária com eletrólito espesso;
- Preparação de materiais compósitos de anodo e de catodo para uso efetivo em meia-células [11];
- Preparação e caracterização de materiais compósitos de anodo (NiO/YSZ) e de materiais de catodo (LSM-YSZ) para célula unitária de alta temperatura usando o eletrólito denso [12];
- Caracterização de meia-células com eletrólito espesso, usando o potenciostato [13];
- Especificação de equipamentos para o LaMPaC [14];
- Célula unitária de eletrólito espesso, preparada sobre uma pastilha de zircônia estabilizada com ítria (YSZ) no tamanho para uso no DHCEL [15];
- Estudos reológicos das barbotinas de anodo e caracterização dos filmes obtidos por aerografia [16], [17];
- Estudos das placas bipolares utilizando diferentes ligas metálicas;
- Atualização bibliográfica;
- Projetos construtivos do protótipo P50W, dos sistemas de controle térmico, de testes e de gases [18];
- Desenvolvimento e caracterização de pó, barbotina e filme de anodo suporte obtido por moldagem em fitas (*tape casting*) [19];
- Detalhamento no sistema de testes do protótipo;
- Projeto e execução de um dispositivo de testes de vedação dos selantes e aquisição de placas bipolares;

- Desenvolvimento e caracterização de filmes cerâmicos para as meias-células com eletrólitos finos;
- Projeto execução e testes do Protótipo PA (preparação para o protótipo final P50W) [20];
- Aprimoramento do processo do filme de anodo suporte obtido por moldagem em fita;
- Modificação na suspensão, processamento e caracterização do filme de catodo [21];
- Testes de vedação dos selantes;
- Construção e execução e testes do Protótipo PB (preparação para o protótipo final P50W) [22];
- Construção e execução e testes do Protótipo PC (preparação para o protótipo final P50W) [23];
- Execução e testes do Protótipo P50W [24].

D. Benefícios do projeto

Este projeto proporcionou a geração e difusão de conhecimento; formação e capacitação de profissionais para lidar com a tecnologia, inclusive com competências para direcionar estrategicamente o assunto. Buscaram-se desenvolvimentos que resultem em transferência tecnológica para a indústria e recebimento de royalties além de alavancar a tecnologia nacional com aumento da oferta de empregos, redução da dependência de tecnologia importada e na geração de patentes. A SOFC visa também o aumento da segurança e eficiência energética. Este desenvolvimento proporcionou uma oportunidade de consolidar a interação entre a Cemig/UFMG no desenvolvimento científico e tecnológico nacional.

O LaMPaC (DQ/UFMG) se firmou como um centro de excelência no desenvolvimento de materiais e montagem de protótipos de pilhas a combustível de óxido sólido. Sendo pioneiro no Brasil na montagem de protótipos contendo mais de uma célula unitária e até o momento único a utilizar tecnologia nacional em todas as etapas do processo que vai desde a síntese dos materiais por via química até a montagem do protótipo, mesmo para os interconectores e peças acessórias, usadas na montagem dos protótipos. O LaMPaC através da realização deste projeto encontra-se capacitado para o serviço de consultoria em toda a cadeia de produção de um protótipo de célula a combustível do tipo SOFC, desde o composto químico, passando pelos processos de suspensão, montagens de meia-célula de anodo, catodo e filme fino de eletrólito, até a geração de células unitárias e testes diversos de caracterização na mesma e construção e testes em protótipos de células empilhadas.

Além disso, houve a participação em diversos fóruns científicos e tecnológicos em âmbito nacional e internacional. Foram defendidas 5 dissertações de mestrado e 2

teses de doutorado, além de publicação de 7 artigos em revista e 42 artigos em anais de congressos e seminários, sendo 34 desses apresentados nos eventos.

E. Principais dificuldades [11]-[24]

As principais dificuldades associadas a este projeto foram:

- A preparação do material cerâmico constituinte da SOFC exige um processamento químico bastante extenso, trabalhoso, bastante sujeito a interferências de natureza química, de processo e manuseio;
- Necessidade de diversas adaptações decorrentes dos estudos e do processo de simulação e projeto;
- Dificuldades inerentes ao trabalho com hidrogênio e a alta temperatura;
- Difícil processo de homogeneização da temperatura dos gases, quando de operação da célula; Problemas de homogeneização e sinterização no compósito LSM-YSZ; Dificuldades de homogeneização de pintura com tinta LSM sobre pastilhas de YSZ;
- Defeitos e falhas em equipamentos essenciais para a síntese da meia-células, agravado pela dificuldade de assistência técnica;
- Atraso de obras de construção do laboratório, entrega de equipamentos e serviços;
- Vazamentos e dificuldade de selamento dos gases;
- Estrutura elétrica do laboratório inadequada para o funcionamento simultâneo de vários fornos, o que acarretou um baixo rendimento do processo de fabricação das células unitárias;
- Dificuldades de estabilidade do material quando submetido ao aquecimento necessário para sinterização e operação da célula. A Figura 3 mostra diversas unidades descartadas por empenamento ou trinca durante o processo de síntese.

Figura 3 – Eletrodos danificados no processo de síntese.

10.3 Laboratório de Materiais e Pilha a Combustível

O LaMPaC foi construído no campus da Universidade Federal de Minas Gerais anexo ao departamento de química. O laboratório possui uma área instalada de aproximadamente 70 m² construída em 2 pavimentos, sendo composto das salas: de reunião, laboratório de reações, sala do protótipo e refrigeração. As Figuras seguintes mostram a estrutura necessária para o desenvolvimento do protótipo de SOFC de 50 W.

A sala do protótipo foi construída com pé direito duplo, instalações elétrica anti-explosão, sensores de presença de hidrogênio, além de procedimentos operativos de segurança a fim de se executar o trabalho de desenvolvimento do protótipo lidando com o gás hidrogênio em plena segurança. A casa de gases foi instalada fora da edificação e teve as tubulações instaladas atendendo as normas de segurança do corpo de bombeiros. Os materiais constitutivos da instalação foram escolhidos de forma a se minimizar a propagação de fogo.

O LaMPaC foi equipado com os seguintes equipamentos principais e essenciais ao desenvolvimento do protótipo:

- Contador laser;
- Tape casting;

- Screen printing;
- Forno de sinterização de 1700 ºC;
- Forno para a célula unitária;
- Forno para o protótipo;
- Potenciostato;
- Sistema de controle de gases;
- Sistema de testes do protótipo;
- Sistema de térmico do protótipo;
- Reômetro;
- Medidor de tamanho de partículas (potencial Zeta).

Figura 4 – LaMPaC na UFMG.

Figura 5 – Sala de reunião.

Figura 6 – Laboratório de reações.

Figura 7 – Sala do protótipo: a) sala b) unidade de testes do protótipo.

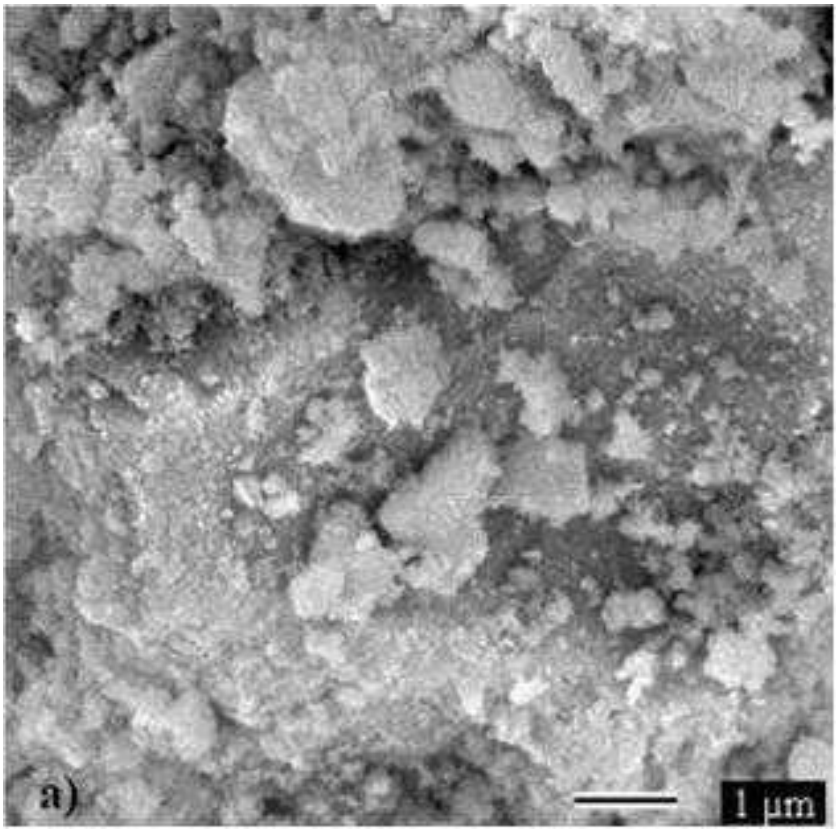
Figura 8 – Sala de refrigeração.

10.4 Resultados e Discussões

Ao longo deste projeto vários procedimentos para fabricação das pilhas unitárias a combustível de óxido sólido foram experimentados. Estes procedimentos envolveram, dentre outros, rotas de síntese de pós, fabricação de suspensões cerâmicas, processos de deposição de filmes e tratamentos térmicos [24].

Na rota utilizada para a produção de zircônia estabilizada com ítria (YSZ), os reagentes usados foram: oxicloreto de zircônio octahidratado (ZrOCl2.8H2O) (98 %), óxido de ítrio e ácido nítrico. Os pós de YSZ foram caracterizados Método Brunauer, Emmett e Teller (BET), difração de raios X Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), este último ensaio é ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 – Micrografia do pó de YSZ [24].



As suspensões de eletrólito foram preparadas utilizando-se: YSZ, óleo de peixe, polietilenoglicol, álcool polivinílico, Etilenolgolicol e foram caracterizadas segundo os métodos de análise térmica, estudo reológico e medidas de potencial zeta. A deposição do filme de eletrólito foi feita sobre um filme de anodo de formato arredondado com aproximadamente 17 mm de diâmetro e 1 mm de espessura e em seguida houve tratamento térmico em forno. Os filmes de eletrólito foram então caracterizados usando microscopia ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

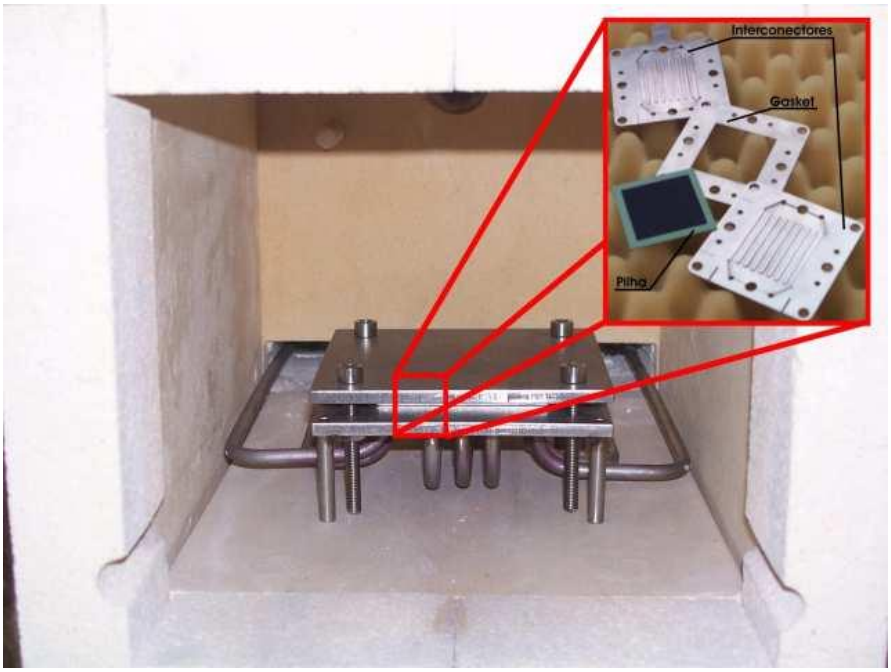
O pó de La0,8Sr0,2MnO3 (LSM) que melhor se adequou à síntese dos filmes de catodo foi o pó obtido pela rota citrato. A caracterização foi realizada utilizando Difração de raios X (DRX), BET, MEV. As suspensões de LSM citrato e suspensão do compósito formado por zirconia estabilizada com ítria (YSZ) e LSM citrato foram preparadas e caracterizadas usando análise térmica e estudo reológico.

Os filmes de catodo foram obtidos utilizando serigrafia e pintura com pincel. A caracterização do filme de anodo foi realizada através de: MEV, microscopia ótica, espectroscopia de impedância.

Na síntese do anodo, este foi depositado pelo método de moldagem em fitas para obtenção do anodo suporte e por aerografia para obtenção do anodo funcional. A caracterização neste caso foi feita análise térmica, difração de raios X e BET.

A célula unitária para medida de impedância foi preparada utilizando o anodo suporte depositado por moldagem em fitas. Sobre o anodo foi depositado o eletrólito com pincel e sobre o eletrólito, foi depositado o catodo. Foi realizado o tratamento térmico para calcinação e sinterização do filme entre as deposições. As medidas de impedância na célula unitária foram realizadas conforme descrito acima para as medidas no anodo funcional. Na Figura 10 encontra-se a montagem para testes na célula unitária. A Figura 11 apresenta o resultado das medidas de densidade de potência da célula.

Figura 10 – Estrutura dos testes da célula unitária.



O protótipo final foi feito empilhando-se 3 pilhas unitárias de óxido sólido com eletrólito fino. A área útil das pilhas utilizadas é de 4 cm² e a geométrica de 5 cm². O procedimento de montagem do Protótipo envolve várias etapas feitas a 4 ou 6 mãos. Ele exige concentração e dura cerca de 12 horas. A Figura 12 mostra o protótipo final pronto para os ensaios.

Figura 11 – Densidade máxima de potência da célula unitária [24].

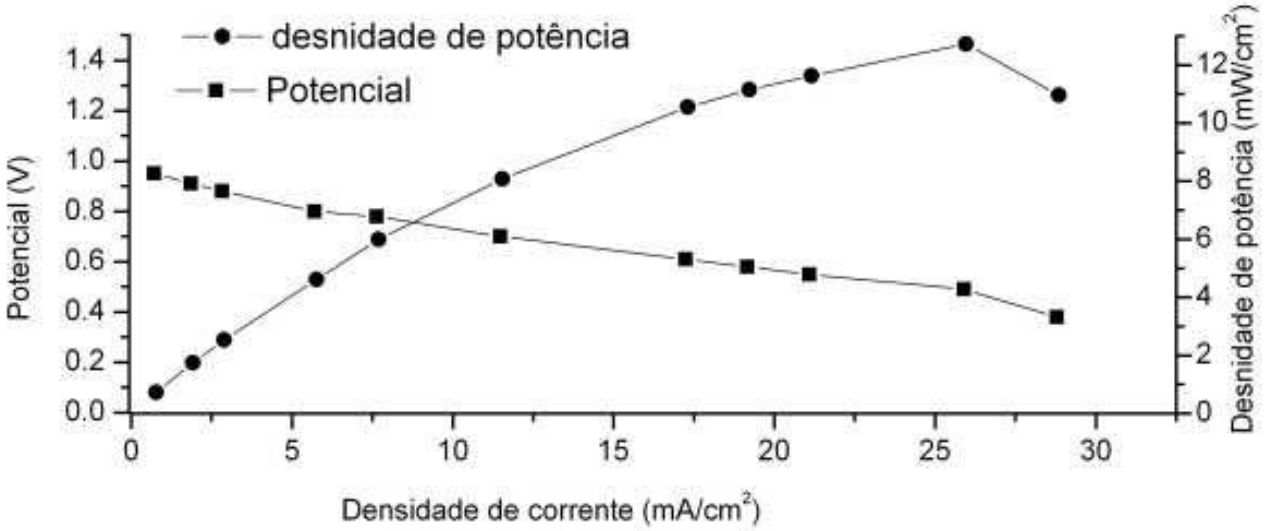


Figura 12 – Stack montado para o teste final [24].

Após a montagem foi feito o procedimento de redução do anodo que visa reduzir o composto cerâmico NiO/YSZ, transformando-o no material de anodo Ni/YSZ. Na temperatura de 900 ºC o potencial de circuito aberto da pilha estabilizou-se em torno de 1,9 V. Os ensaios de cronopotenciometria galvanostática permitiram avaliar o desempenho da pilha a 900 ºC e com fluxo de 500 mL/min. de ar e 500 mL/min. de H2 por pilha unitária. A potência obtida foi de 1,3 W. Os resultados desta pesquisa podem ser sumarizados conforme a Tabela I:

Tabela I – Resultados do Projeto de P&D 097.

Produtos	*Estagio antes do Projeto*	*Patentável/ comercializavel*
Pós – anodo	NE	Não/Sim
Pós – eletrólito	E	Não/Sim
Pós – catodo	NE	Não/Sim
Susp. Anodo	NE	Sim/Sim
Susp. Eletrólito	NE	Sim/Sim
Susp. Catodo	NE	Sim/Sim
Filmes anodo	NE	Sim/Sim
Cél. Unitária	NE	Não/Sim
Protótipo	NE	Sim/Sim
Placas bipolares	NE	Sim/Sim

Legenda: Susp.: suspensão; Cél.: célula; NE: não existente; E: existente.

10.5 Conclusões

Este projeto possibilitou a criação do LaMPaC no DQ/UFMG e o desenvolvimento da pesquisa de construção de um protótipo de SOFC de 50 W. Foram formados 2 doutores e 5 mestres e constituída um equipe que publicou 7 artigos em periódicos e 42 artigos em congressos, tendo participado e apresentados os resultados em diversos fóruns científicos. A expectativa de sucesso deste projeto foi proporcional às dificuldades encontradas. Muitas das dificuldades, inerentes ao processo de pesquisa dificultaram sobremaneira a obtenção de resultados mais expressivos. De maneira geral, como exemplos de fatores externos, pode-se citar: atrasos de natureza diversa, dificuldades de se encontrar fornecedores. As dificuldades associadas a pesquisa com hidrogênio, materiais cerâmicos e altas temperaturas, tiveram a sua maior barreira dada pela dificuldade de homogeneidade nos processos e estanqueidade na operação das células unitárias. Foram desenvolvidos com sucesso procedimentos próprios para a fabricação de parte fundamentais da SOFC e protocolos experimentais para caracterização e testes, que direcionam inclusive para oportunidades comerciais e de patenteamento. A parte química e estrutural da célula unitária encontra-se em estágio dominado, apesar de carecer de melhoramentos. Foram construídos e testados diversos protótipo de células unitárias, cujos resultados indicaram modificações necessárias para os futuros experimentos. O protótipo P50W foi construído e testado obtendo a densidade máxima de potência na ordem de 12 mW/cm², com um potencial de circuito aberto estabilizado em 1,9 V à 900 º C e com uma potência máxima de 1,3 W. Certamente este valor é muito abaixo da proposta, entretanto ainda sim pela natureza e complexidade da pesquisa trata-se de um grande avanço em se tratado de resultados do empilhamento de 3 células unitárias de SOFC. Os estudos e testes de vedação e interconexão se mostraram como condições críticas e onde os desenvolvimentos dever ser realizados primeiramente.

As tecnologias do hidrogênio são uma realidade com grandes dificuldades a serem enfrentadas em projetos de maior dimensão, envolvendo ainda equipes multidisciplinares. Entretanto se mostram ainda como uma importante opção para um futuro de médio/longo prazo na constituição do conjunto de soluções para a questão energética mundial. A Cemig teve com este projeto a oportunidade de conhecer toda a cadeia de produção da SOFC ou PaCOS, aprendendo com o estado da arte, avaliando oportunidades de negócios, fomentando e estimulando a pesquisa e o desenvolvimento de recursos humanos. A expectativa no desenvolvimento de uma unidade comercial ainda se mantém, pois a proposta de projetos nas tecnologias do hidrogênio encontra-se bastante alinhada com o senso de responsabilidade ambiental e social, na produção de energia limpa e de forma renovável e no uso mais eficiente. As dificuldades deste projeto refletem as dificuldades encontradas em âmbito mundial. Desta forma o projeto P&D 097 se encerra, mas um novo será iniciado, o P&D 291, que trata da construção de um protótipo de SOFC de 1 kW. Realmente trata-se de um projeto audacioso mas que precisa ser feito para dar continuidade aos desenvolvimentos já realizados, buscando resolver agora os gargalos de engenharia de produto.

Capítulo 11

Capítulo 11: Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW[11]

***Resumo* – A busca por sistemas de geração de energia mais eficientes e menos poluentes tem despertado grande interesse nas empresas geradoras de energia e na comunidade acadêmica. Neste contexto, as pilhas a combustível de óxido sólido apresentam características que as colocam como uma das principais alternativas de geração limpa de energia. Estas pilhas, quando alimentadas por hidrogênio, têm rendimento superior a 70 % e liberam água como único produto da reação. Este artigo relata o desenvolvimento do projeto em que foram construídos dois protótipos de pilhas a combustível de óxido sólido. Os resultados indicam uma potência alcançada próxima a 160 W. Este resultado, inédito no Brasil, comprova a excelência da Companhia Energética de Minas Gerais e do Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível da Universidade Federal de Minas Gerais no desenvolvimento de fontes alternativas de energia.**

11.1 Introdução

As pesquisas relacionadas a pilhas a combustível têm sido intensificadas devido ao aumento da demanda de energia e à necessidade de produção de energia de forma mais eficiente e com menor impacto ambiental. Este tipo de tecnologia tem se destacado por ser um método muito eficiente de produção de energia, com mínima ou nenhuma emissão de poluentes tóxicos e de ruídos [1,2].

As pilhas a combustível são dispositivos que realizam a conversão da energia química contida em um combustível, usualmente o hidrogênio, diretamente em energia elétrica. Diferentes tipos de pilhas a combustível têm sido desenvolvidos, sendo os principais apresentados na Tabela 1 [3].

Tabela 1 – Principais tipos de Pilhas a Combustível.

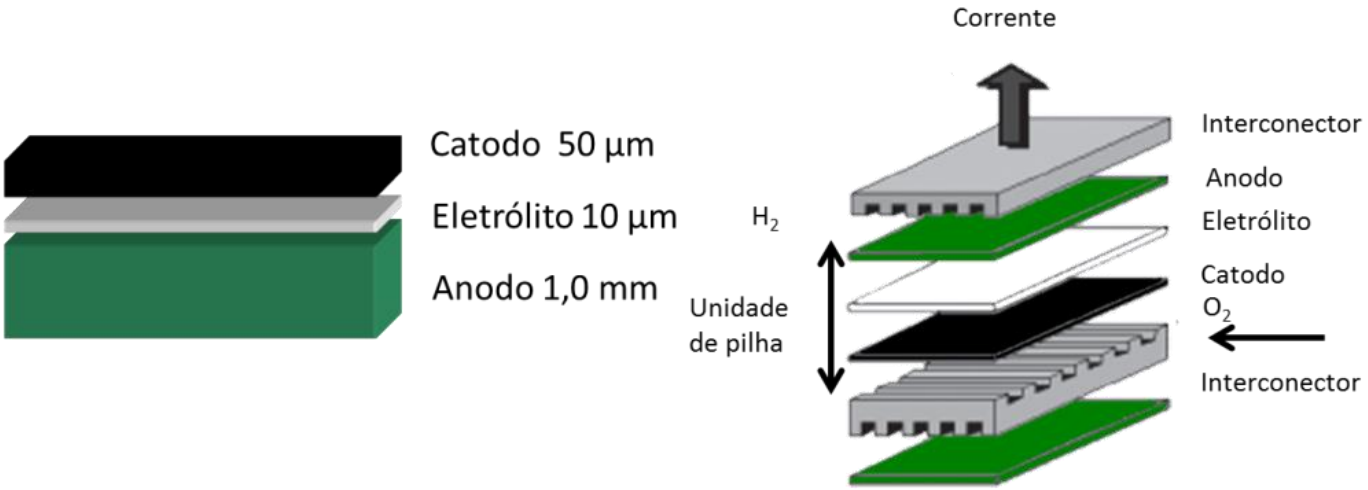
Tipo	Eletrólito	Temperatura de operação
Pilha a Combustível de Membrana Polimérica	Polímero	40 – 80 °C
Pilha a Combustível Alcalina	Hidróxido de potássio	65 – 220 °C
Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico	Ácido fosfórico	205 °C
Pilha a Combustível de Carbonato Fundido	Carbonato Fundido	650 °C
Pilha a Combustível de Óxido Sólido	Cerâmica	600 – 1000 °C

[11] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; NASCIMENTO, G. L. T.; ALMEIDA, R. M.; MADUREIRA, A. J. V.; SILVA, C. H. F. da. Publicado em Revista de P&D Aneel Ed. 2015, Brasília, p. 1 3.

As Pilhas a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS), que operam a altas temperaturas, apresentam algumas vantagens frente a outros tipos de pilhas como: elevada eficiência na produção de eletricidade, facilidade de gerenciamento do eletrólito sólido e possibilidade de reforma do combustível (conversão em gás de síntese H2 e CO) no próprio corpo da célula. Desta forma, várias fontes de hidrogênio podem ser utilizadas pela pilha a combustível, tais como: gasolina, gás natural, óleo diesel, gás de síntese, metanol, etanol, biodiesel, etc. O rendimento elétrico desta pilha pode chegar, teoricamente, a acima de 70%. Este valor é muito superior aos obtidos pelas máquinas térmicas cujos rendimentos não chegam a 30% [4]. Além disso, este gerador não emite ruído.

As PaCOS são constituídas, fundamentalmente, por células unitárias compostas por dois eletrodos porosos, catodo e anodo, separados por um eletrólito denso de elevada condução iônica. Para obter-se uma potência elevada, é necessário fazer o empilhamento ("stack") de células unitárias, ligando-as em série ou em paralelo através de interconectores [5]. A Figura 1 apresenta a configuração de uma célula a combustível e uma unidade de uma pilha “stack”.

Figura 1 – Imagens ilustrativas de uma célula a combustível suportada pelo anodo (direita) e uma unidade básica de pilha (esquerda).



Nesta temática, surgiu o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico intitulado “Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW”. Este trabalho teve como predecessor um projeto que visava à construção de protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W, e integra o portfólio de pesquisa da Cemig, empresa que se destaca como grande investidora nesta linha de pesquisa quando comparada as demais concessionárias de energia elétrica no Brasil [6].

O objetivo principal do projeto foi o desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Além disso, o projeto visou, entre outros, o desenvolvimento da tecnologia nacional para síntese, conformação e sinterização de sistemas cerâmicos destinados à elaboração dos materiais de anodo, catodo e eletrólito que serão empregados nas células unitárias das PaCOS e a formação de mão-de-obra especializada para desenvolvimento e fabricação deste tipo de pilhas no Brasil.

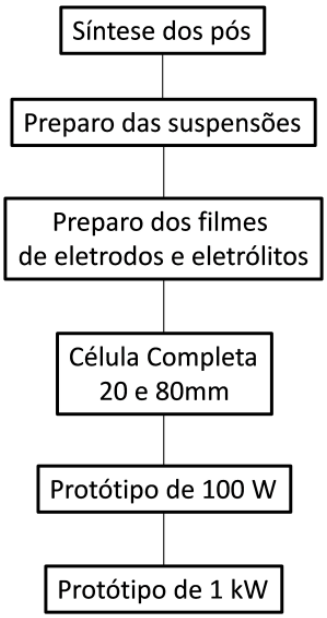
Para alcançar tais objetivos, empregou-se uma metodologia de scale-up em que o estudo de otimização foi feito inicialmente em células botões com 20 mm de diâmetro e aplicado, posteriormente, em células de 80 mm utilizadas no protótipo. O projeto gerou como produtos principais dois protótipos. A construção e o acionamento dos protótipos de PaCOS com geração de potência superior a 100 W colocam o LaMPaC e a Cemig como pioneiras no Brasil em pesquisas nesta área. Este é o primeiro relato de testes com PaCOS capaz de fornecer esses valores de potência.

O desenvolvimento de PaCOS é estratégico para a Cemig, uma vez que ela estará investindo em uma nova tecnologia de geração de energia, que pode utilizar combustíveis alternativos e renováveis, com elevada eficiência e baixo impacto ambiental.

11.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A fim de desenvolver o protótipo, o projeto foi dividido em três etapas. A primeira visou otimizar a elaboração dos componentes isolados (anodo, eletrólito e catodo) e das células unitárias. Estudos de meia-células permitiram avaliar o desempenho de cada componente antes da confecção da célula unitária. Na segunda etapa foram feitos testes eletroquímicos em células botões com diâmetro de 20 mm, em seguida, foram fabricadas células com diâmetro de 80 mm a partir dos parâmetros otimizados das células botões. Na terceira etapa foram montados e testados os dois protótipos. A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas.

Figura 2 – Fluxograma das etapas do projeto.



A. Síntese dos pós [7]

A maior parte dos pós utilizados na fabricação das células foram sintetizados no LaMPaC. Com isto, o laboratório desenvolveu tecnologia própria para a síntese de pós cerâmicos. A Tabela 2 apresenta os constituintes químicos de cada um dos pós cerâmicos sintetizados bem como sua função na PaCOS.

Tabela 2 – Materiais cerâmicos desenvolvidos no projeto e sua função.

Material	Abreviatura	Função
Céria dopada com gadolínio e zircônia dopada com ítria	CGO/YSZ	Precursores de eletrólito para PaCOs.
Óxido de níquel e óxido de zircônia dopada com ítria.	NiO/YSZ	Precursores de anodo para PaCOs.
Ferrita cobaltita de lantânio dopada com estrôncio	LSCF	Precursores de catodo para PaCOs.

Todos os pós sintetizados foram caracterizados por difração de raios X, espalhamento de luz dinâmico e isoterma de adsorção de gás nitrogênio.

Na difração de raios X foi utilizado um difratômetro de raios X da RIGAKU, modelo Geigerflex, radiação CoKα, com tensão de 32,5 kV, corrente de 25 mA para

o método de rotina. Os resultados de difração foram analisados por comparação com os padrões de difração de *Joint Commitee of Powder Diffraction* - JCPDS.

A análise de espalhamento de luz dinâmico baseou-se na suspensão do pó em etilenoglicol com auxílio de um ultrassom durante 5 minutos. Após esse tempo, cada suspensão permaneceu em repouso por 3 horas para sedimentação dos aglomerados. O sobrenadante foi então analisado em cubeta de vidro no aparelho Zetasizer 3000 (M/S Malvern Instruments Ltd, UK).

A análise de adsorção de gás nitrogênio foi realizada a 77 K usando o analisador de adsorção Quantachrome Nova 2200. Antes das medidas de adsorção, as amostras foram desgaseificadas, por 4 h, a 393 K. Os dados foram tratados com o programa NovaWin V.10_ 1997–2007 Quantachrome Instruments *Software* (Boynton Beach, FL, USA).

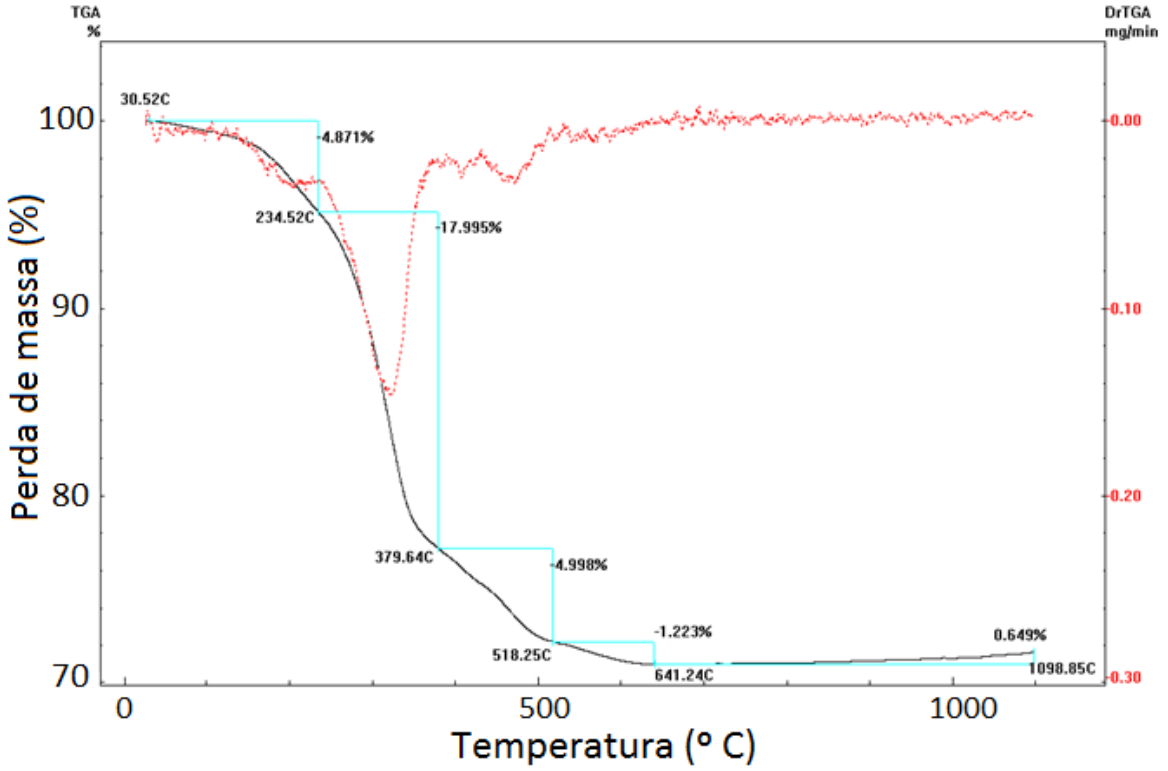
Através de tais análises foi possível determinar a estrutura cristalina, o tamanho médio das partículas e a área superficial de cada pó.

B. Preparo das suspensões de eletrólito e eletrodo [8]

As suspensões de anodo, catodo e eletrólito são as precursoras dos filmes que compõem a célula a combustível. Elas foram preparadas a partir dos pós sintetizados, tendo sido caracterizadas por análise térmica e por reologia.

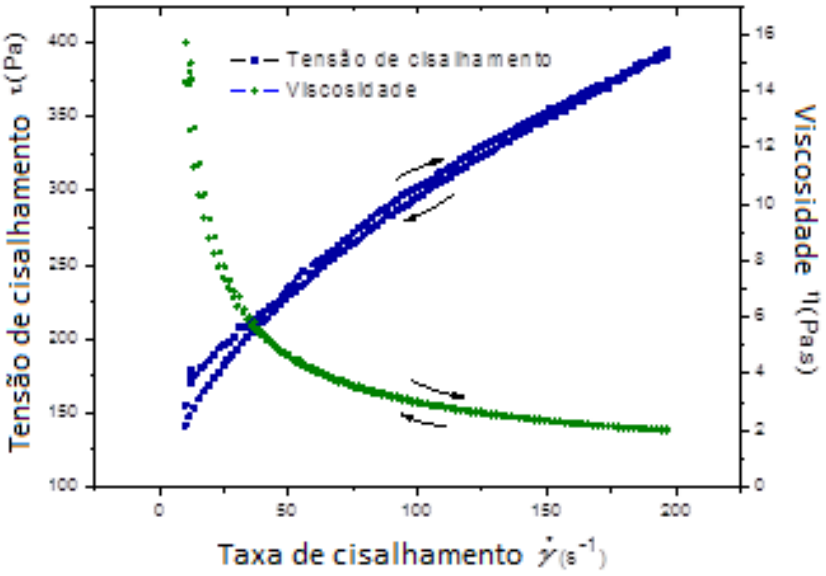
A análise térmica visa o estudo do comportamento do material durante o processo de aquecimento, medindo a sua perda de massa em função da variação da temperatura. Essas informações são importantes na elaboração das rampas de temperatura do tratamento térmico dos filmes que serão fabricados. A Figura 3, mostra em caráter ilustrativo, uma análise térmica da suspensão de anodo de NiO/YSZ. Foi utilizado o aparelho da marca Shimadzu modelo DTG60.

Figura 3 – Curvas TG, DTG e DTA para a suspensão de NiO/YSZ.



O comportamento reológico das suspensões indica o nível de floculação das partículas. As medidas reológicas foram feitas no Reômetro Haake Rheostress 600 em modo de taxa controlada. Como exemplo, a Figura 4 mostra a análise reológica da suspensão de CGO.

Figura 4 – Curvas de fluxo de suspensão produzida com 40 % de pó CGO.



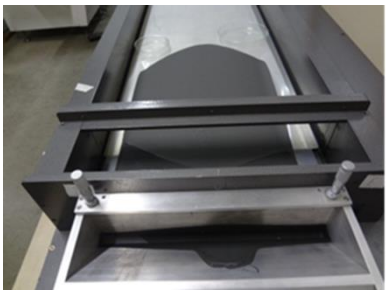
A suspensão de CGO apresentou comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade decresce com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento favorece a deposição da suspensão. No caso da serigrafia, a passagem da suspensão através da tela é favorecida. Quanto ao comportamento ao longo do tempo, a suspensão apresentou-se levemente tixotrópica, isto é, a viscosidade diminui ligeiramente ao longo do tempo.

C. Preparo dos filmes de eletrólito e eletrodo [9]

Foram utilizadas três técnicas de deposição, escolhidas de acordo com as características desejadas para cada filme. Os filmes de anodo foram preparados por colagem em fitas (tape casting), os de eletrólito por pincel e areografia e os de catodo por serigrafia. A seguir serão detalhadas as técnicas de deposição dos filmes.

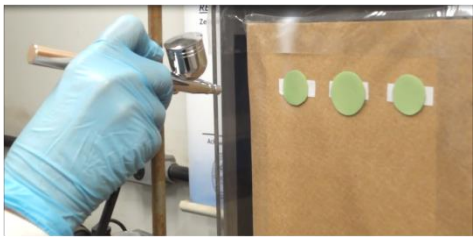
Na técnica tape casting, a suspensão precursora do ando é vertida em um compartimento do equipamento com uma saída móvel, chamada de doctor blade, cuja altura regulável determina a espessura do filme. Abaixo do blade, move-se uma esteira que faz o arraste da suspensão. O doctor blade foi ajustado para formar filmes de anodo com espessura de 1,0 mm. A Figura 5 mostra uma visão superior e lateral de parte do Tape Casting durante o processo.

Figura 5 – Processo de colagem de fita de anodo: visão superior (esquerda) lateral (direta) de parte do aparelho de Tape Casting durante a colagem da fita de anodo.



A deposição do filme de eletrólito de YSZ foi realizada por areografia sobre a pastilha de anodo usando um equipamento da marca Aeromax, modelo AE-10. Foram realizadas 3 deposições de filme. Após estas deposições foi feito o tratamento térmico do filme e, posteriormente, os mesmos foram sinterizados a 1500 ºC por 6 h. A Figura 6 apresenta o sistema de deposição por areografia formado por uma bomba de vácuo e um aerógrafo.

Figura 6 – Sistema de deposição de YSZ por aerografia.



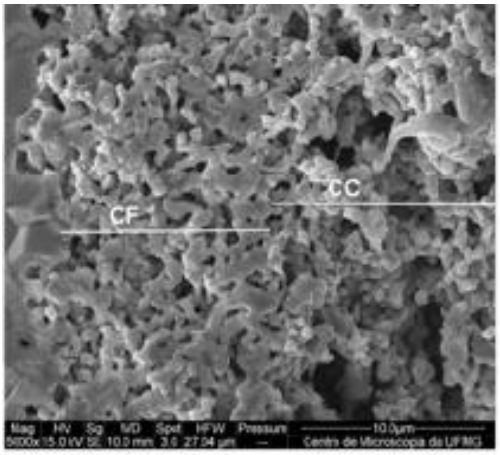
Os filmes de CGO foram elaborados por serigrafia em equipamento Screen printer semiautomática EKRA E1HYB com tela de 150 mesh, conforme Figura 7. Os substratos utilizados foram os anodos de NiO/YSZ recobertos com os filmes de YSZ. Após a obtenção da espessura desejada, as amostras foram sinterizadas.

Figura 7 – Equipamento de deposição de eletrólito CGO.

Os filmes de LSCF foram elaborados, semelhantemente aos filmes de CGO, por serigrafia em equipamento Screen printer semiautomática EKRA E1HYB com tela de 150 mesh. Os substratos utilizados foram os anodos de NiO/YSZ recobertos por filmes de YSZ e de CGO. Após a aplicação de nove camadas, as amostras foram sinterizadas.

A principal técnica utilizada para a caracterização dos filmes das células foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Por meio das imagens obtidas foi possível diferenciar cada filme, bem como, verificar suas estruturas. Tal análise permite, entre outros, o controle de camadas com características intermediárias entre o eletrodo e o eletrólito. Essas camadas, denominadas Camadas Funcionais (CF), proporcionam um gradiente de composição e de porosidade que evita incompatibilidades químicas e mecânicas entre materiais. A camada externa e porosa do eletrodo, responsável pelo contato eletroquímico com o circuito externo, é denominada Camada Coletora de Corrente, ou simplesmente Camada Coletora (CC). A Figura 8 apresenta a microestrutura de um catodo bicamada CF/CC. [10].

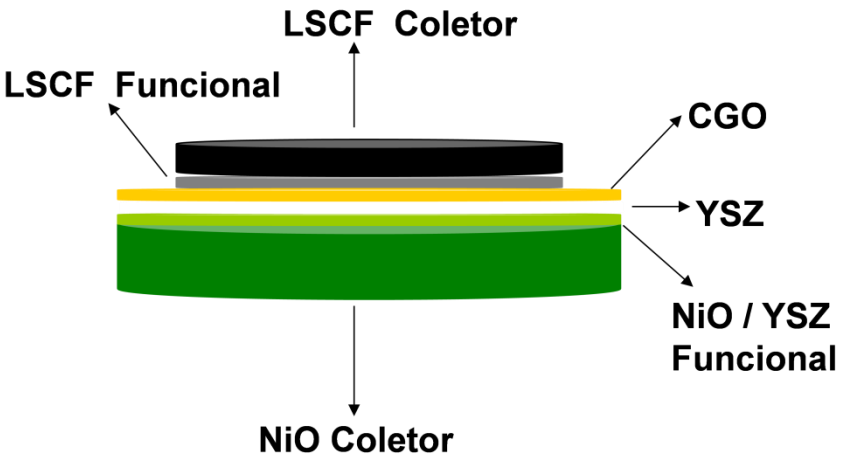
Figura 8 – Microestrutura de um catodo bicamada.



D. Célula completa de 20 e 80 mm [12]

As células elaboradas pelo LaMPaC seguiram a estrutura apresentada na Figura 09, utilizando-se como suporte um anodo de óxido de níquel (NiO) com zircônia estabilizada com ítria (YSZ). Após a fita ter sofrido os tratamentos térmicos, foi depositado sobre ela um filme de YSZ por spray e outro filme de céria dopada com gadolínio por serigrafia. Após as camadas dos eletrólitos terem sido densificadas por sinterização, depositaram-se filmes de ferrita cobaltita de lantânio dopada com estrôncio (LCSF) por serigrafia.

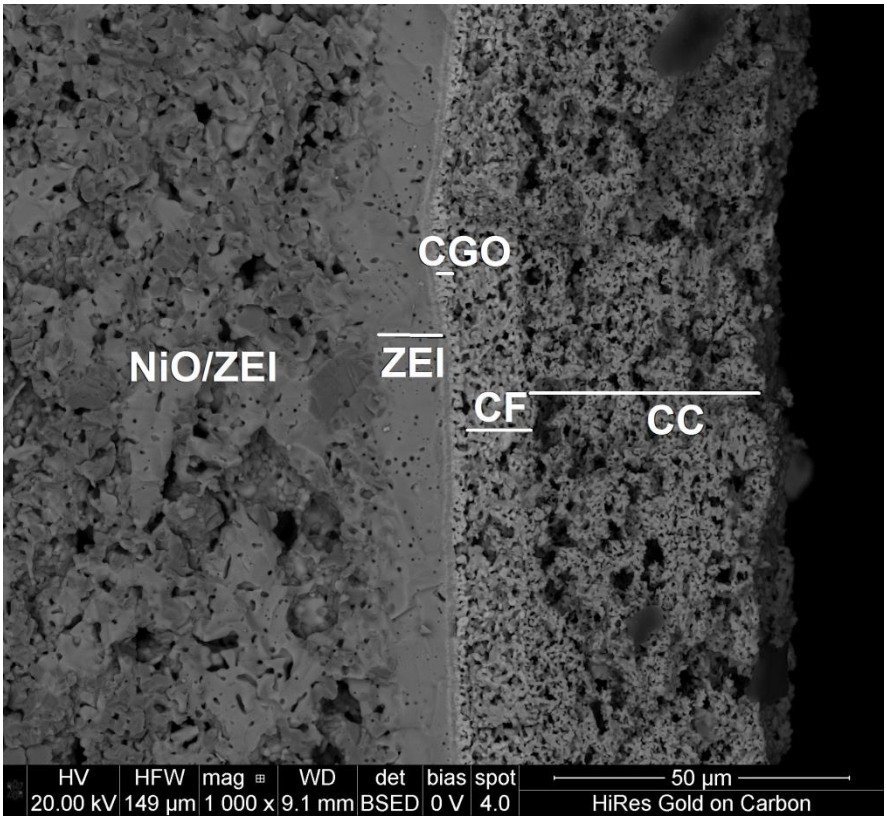
Figura 09 – Desenho das camadas que compõem a célula LaMPaC.



A Figura 10 mostra uma imagem da seção transversal da célula LaMPaC obtida por microscopia eletrônica de varredura após as etapas de otimização. Nesta ima-

gem, observa-se a presença da bicamada de catodo, formada catodo funcional e pelo catodo coletor de corrente [11].

Figura 10 – Imagem obtida por MEV da célula LaMPaC otimizada.

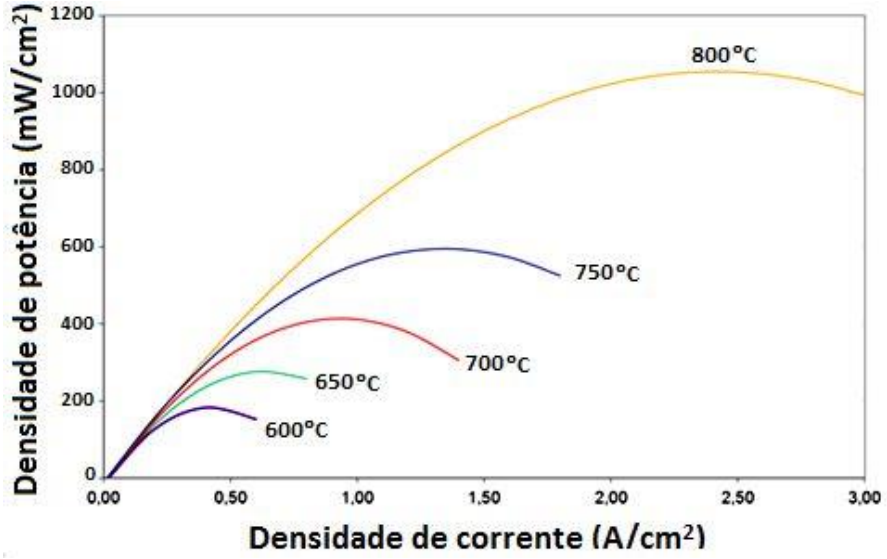


A medição eletroquímica das células botões, de 20 mm de diâmetro, utilizou o equipamento fabricado pela *Norwegian Electro Ceramics SA*, modelo Probostat, apresentado na Figura 11. Ele é composto por uma coluna cerâmica e uma base que recebe a alimentação de gases e coleta a energia gerada. Utilizou-se também um potenciostato, um forno tubular e um sistema de controle de fluxo de gases.

Figura 11 – Equipamento para medidas elétricas das células botões.

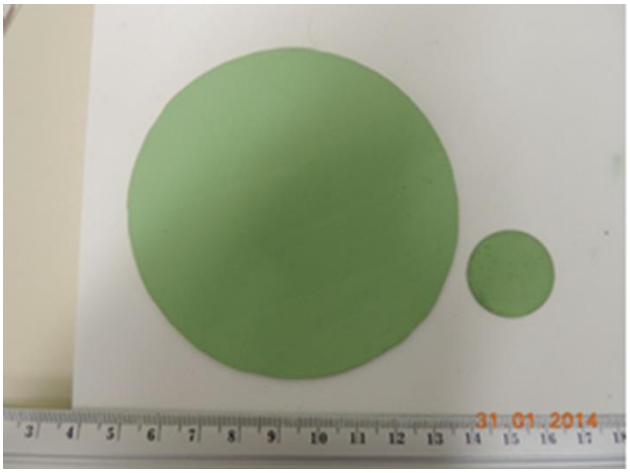
Na Figura 12, observa-se o comportamento das medidas eletroquímicas realizadas para a célula LaMPaC otimizada com camadas funcionais, na qual se verificou uma densidade de potência máxima de 1055 mW/cm² a temperatura de 800 ºC.

Figura 12 – Gráfico das medidas elétricas realizadas na célula com camadas funcionais nas temperaturas de 600, 650, 700, 750 e 800 ºC.



Após a otimização dos componentes da célula botão, a próxima etapa foi a mudança no tamanho da célula de 20 para 80 mm. O aumento do tamanho do anodo foi o principal desafio a ser superado, visto que este é o suporte da célula. A Figura 13 apresenta a imagem dos anodos de 80 e 20 mm obtidos por meio da técnica de moldagem de fitas.

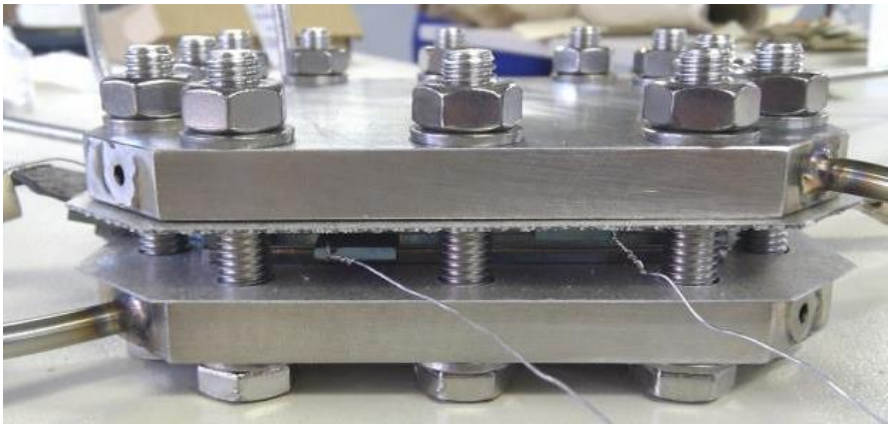
Figura 13 – Imagem dos anodos, 80 e 20 mm obtidos por moldagem de fitas, usados como suporte para as células a combustível.



E. Protótipo de 100 W [12]

O protótipo de 100 W foi composto por três células de 80 mm. Cada célula foi selada em um suporte metálico e em seguida empilhada, gerando o protótipo de 100 W, como apresentado na Figura 14 [13].

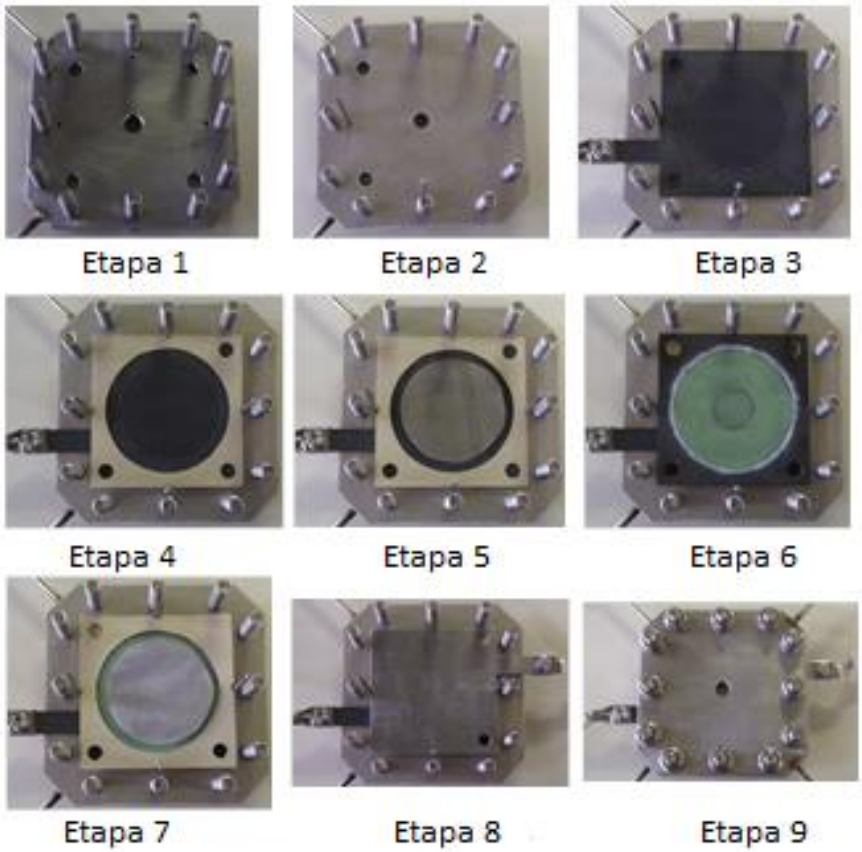
Figura 14 – Protótipo de 100 W montado.



A montagem do protótipo foi realizada em nove etapas. A Figura 15 apresenta as etapas de montagem do protótipo de 100 W, detalhadas a seguir:

- Etapa 1: A base do protótipo é o suporte do empilhamento e possui as tubulações de entrada dos gases. Junto à base, se encaixam os parafusos para fechamento da pilha.
- Etapa 2: Em seguida, coloca-se a folha de mica, formatada à montagem do protótipo. Ela visa garantir a estanqueidade do sistema e prover o isolamento elétrico entre o interconector metálico do catodo e a base. Fixa-se a folha por meio de pinos-guia que mantem a montagem alinhada.
- Etapa 3: Coloca-se o interconector referente ao catodo. Ele possui a função de distribuir o oxigênio por igual na célula do protótipo, além de realizar o contato elétrico.
- Etapa 4: Novamente coloca-se uma folha de mica para garantir o isolamento elétrico entre o interconector e o suporte metálico, bem como, a estanqueidade do sistema.
- Etapa 5: Aplica-se a tela coletora de corrente, que realiza o contato elétrico entre catodo e interconector metálico. Ela deve possuir boa condutividade a altas temperaturas e resistência para operar em atmosferas oxidantes.
- Etapa 6: Instala-se o suporte metálico com a célula propriamente dita, já com o selante vítreo.
- Etapa 7: Em seguida, instala-se a mica e a tela coletora de corrente do anodo, preparando a camada para receber o interconector no qual passará o hidrogênio.
- Etapa 8: Repetem-se as etapas até empilhar três células. Coloca-se o interconector de fechamento do anodo, que possui apenas a face de passagem do hidrogênio. Coloca-se uma folha de mica para isolar o interconector final e a placa superior do protótipo e retiram-se os pinos-guia.
- Etapa 9: Coloca-se a placa superior do protótipo que possui a tubulação de saída dos gases. O fechamento e compressão do protótipo são assegurados por 12 porcas.

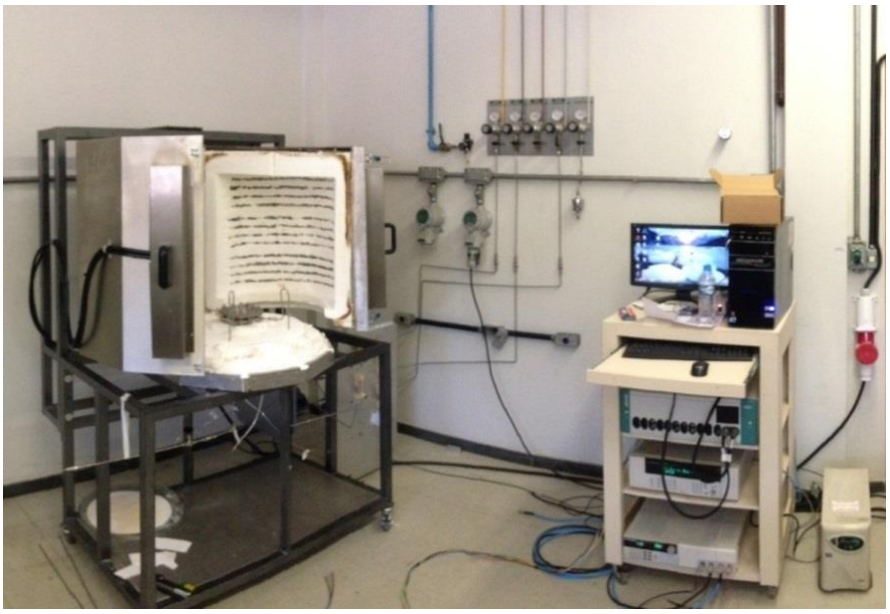
Figura 15 – Etapas da montagem do protótipo de 100 W.



Os testes elétricos do protótipo de 100 W foram divididos em duas partes, uma de aquisição dos dados e outra de tratamento dos dados. Na Figura 16 é apresentado o sistema montado para acionamento do protótipo e aquisição dos dados de medida elétrica. Este sistema, utilizado tanto para o teste no protótipo de 100 W quanto para o de 1 kW, foi composto por:

- Forno tubular vertical bipartido que atinge temperaturas de até 1000ºC;
- Sistema de controle de fluxo de gases;
- Computador para coleta, controle e armazenamento de dados;
- Carga eletrônica de 1200 W modelo 8514 da marca Bk Precision;
- Sistema Agilent modelo 34980A para capturar as leituras de dados em multicanais.

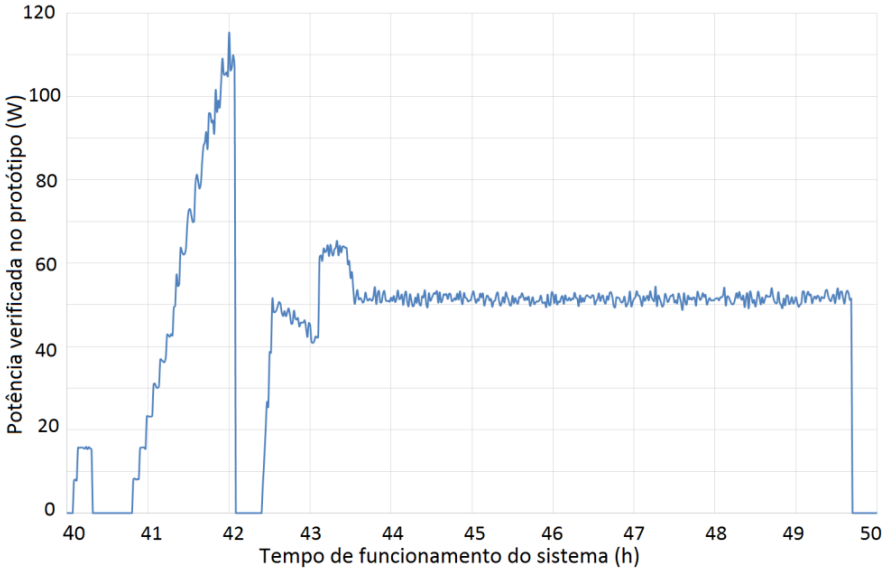
Figura 16 – Fotografia panorâmica do sistema utilizado para os testes elétricos do protótipo de 100 W.



Os testes elétricos iniciaram-se com aquecimento do sistema até atingir a temperatura de 800 ºC. Em seguida foi feito o processo de redução do anodo de NiO para Ni. Este processo consistiu na injeção de hidrogênio no lado do anodo por 40 horas. A redução do anodo foi monitorada por medidas de potencial em circuito aberto. O processo foi considerado finalizado quando o valor do potencial de cada célula atingiu 1,1 V, totalizando 3,3 V.

Posteriormente ao processo de redução iniciou-se o acionamento do protótipo com a injeção de oxigênio no lado do catodo. Utilizou-se as vazões de 250 mL/min para o hidrogênio do lado do anodo e um fluxo de 500 mL/min de oxigênio para o lado do catodo. Para aquisição e posterior tratamento dos dados, variou-se a corrente elétrica em intervalos de 2,5 A até alcançar 40 A. No valor máximo de corrente o protótipo atingiu um pico de 115 W de potência, alcançando o objetivo desta etapa. A Figura 17 mostra o gráfico da potência gerada ao longo do tempo após a etapa de redução das células.

Figura 17 – Gráfico da potência verificada no protótipo, do início dos experimentos com a corrente até o término.



Após 50 horas de experimento o fluxo dos gases foi interrompido, o sistema foi desligado e iniciou-se o tratamento dos dados obtidos. A Figura 18 apresenta as imagens do protótipo antes do acionamento e depois do resfriamento do sistema.

Figura 18 – Fotografias do protótipo do protótipo de 100 W, antes (na esquerda) e após (na direita) o acionamento do sistema.

F. Protótipo de 1kW [12]

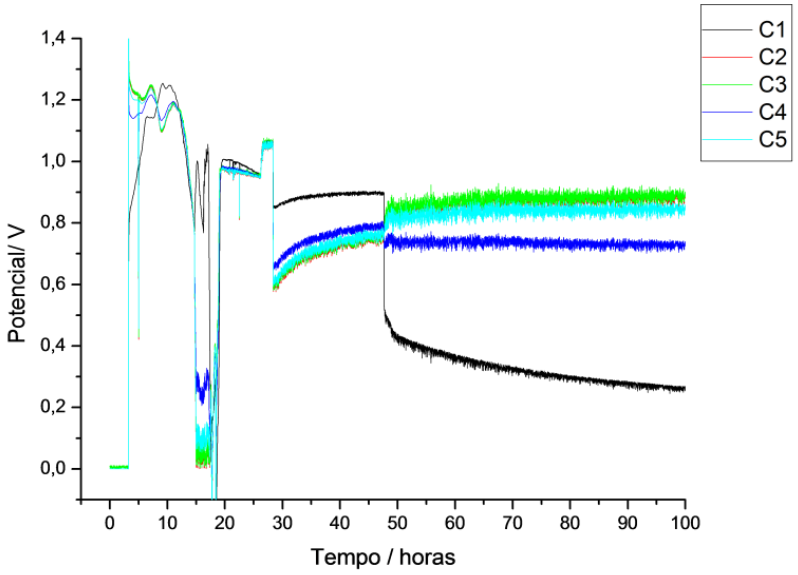
Por razões de segurança, limitações no controle de temperatura e estanqueidade dos gases, foram montados apenas 2 dos 6 módulos necessários para gerar a potência de 1 kW. Os módulos, um contendo 3 células e outro com 2 células, foram montados em série. A montagem e os testes seguiram procedimento e especificação de células semelhantes aos adotados para o protótipo de 100 W. A Figura 19 apresenta o protótipo antes e após as medidas elétricas [14].

Figura 19 – Fotografias do protótipo nominal de 1 kW, antes e após os testes elétricos, respectivamente.

Os testes de funcionalidade do protótipo foram realizados no LaMPaC. Inicialmente o protótipo foi aquecido a uma até 800 ºC. Em seguida, iniciou-se o processo de redução lenta com a alimentação de hidrogênio a 150 mL/min por 5 horas no lado do anodo. Este procedimento foi adotado para se evitar a quebra das células devido à retração que ocorre durante a redução eletroquímica do anodo.

A redução total do NiO a Ni foi alcançada com a injeção de uma mistura de hidrogênio e nitrogênio a uma vazão de 2,5 L/min por mais 5 horas. Então, o fluxo de nitrogênio diminuído gradativamente e o de hidrogênio aumentado até se alcançar uma vazão somente de hidrogênio. O processo de redução foi encerado quando o potencial do protótipo atingiu 5,4 volts, após 10 horas de experimento. A Figura 20 apresenta a evolução do potencial de cada célula durante o processo de redução e acionamento do protótipo.

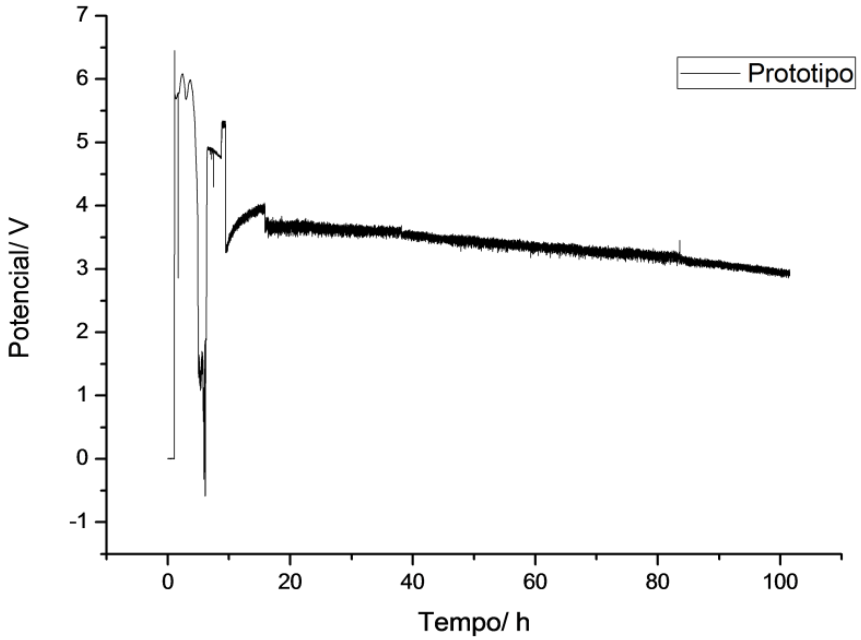
Figura 20 – Gráfico das medidas do diferencial de potencial em V em relação ao tempo, para cada célula do protótipo.



O valor experimental de 1,1 volts de potencial de circuito aberto alcançado por cada célula após o término da etapa de redução indica a completa redução das células e a estanqueidade do sistema.

Ao fim do processo de redução, iniciou-se o acionamento do protótipo a 800 ºC. Nesta fase, o catodo foi alimentado com oxigênio a um fluxo de 3,0 L/min e o anodo com hidrogênio a um fluxo de 1,0 L/min. A Figura 21 apresenta o potencial do protótipo durante seu processo de redução e de funcionamento. Após o acionamento do protótipo, próximo a 10 horas de experimento, o potencial diminui de 5,4 V para 3,0 V devido a perdas por polarização no anodo e no catodo. Em seguida, ocorre um aumento gradativo do potencial até 20 horas de experimento, quando o potencial atinge o valor máximo de 4,4 V. Logo após as 20 horas de experimento notou-se uma queda do potencial para 3,8 V.

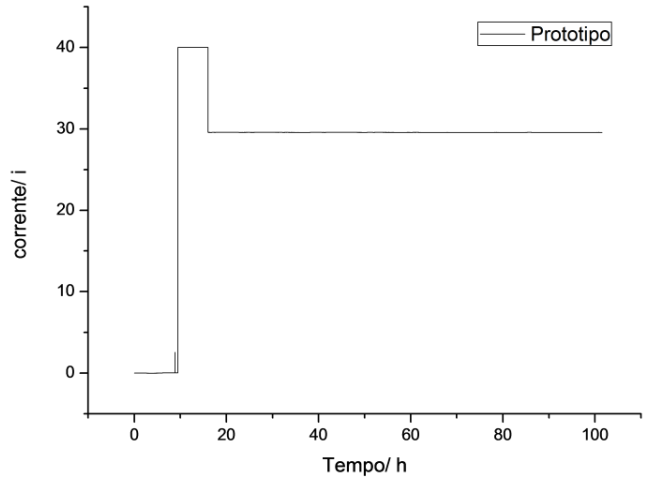
Figura 21 – Gráfico das medidas do diferencial de potencial em V, para o protótipo durante todo o tempo de funcionamento do mesmo.



Esta queda foi atribuída às perdas de rendimento das células 1 e 4. Durante o restante do experimento o potencial se manteve próximo a 3,8 V com ligeira queda após 80 horas de funcionamento. As perdas de rendimentos das células 1 e 4 podem estar relacionadas a vários fatores, dentre eles, a deterioração ou quebra das células, a falta de homogeneidade de temperatura dos gases ou reações paralelas entre os componentes das células. Por medidas de segurança, após 100 horas de funcionamento o protótipo foi desligado.

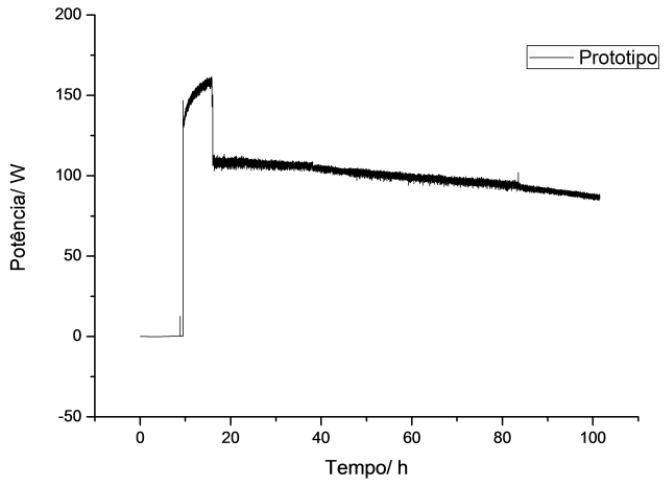
A Figura 22 mostra o comportamento da corrente extraída do protótipo durante o processo de redução e acionamento. Os dados foram filtrados para atenuar os ruídos. Nas primeiras 10 horas, durante a redução do anodo, a corrente extraída foi nula uma vez que o circuito estava aberto. Imediatamente com o acionamento do protótipo é alcançado o pico de corrente de 40 A, valor que permaneceu estável por 10 horas. Posteriormente, a corrente passou para 30 A em razão da diminuição de rendimento das células 4 e 1. Este valor se manteve estável até o desligamento do protótipo.

Figura 22 – Gráfico da corrente durante funcionamento do protótipo.



Na Figura 23 observa-se a curva da potência gerada pelo protótipo, obtida pela multiplicação da diferença de potencial em volts, pela corrente medida em amperes. Imediatamente após o acionamento do protótipo, foi obtida uma potência de 131 W. Observou-se um aumento gradativo entre a décima e a vigésima hora de experimento, até o valor máximo de 161 W. Em seguida, ocorreu uma diminuição da potência devido à queda de potencial das células 1 e 4.

Figura 23 – Gráfico da evolução da potência em função do tempo.



Conforme apresentado na Figura 23, protótipo apresentou um aumento gradual de potência no intervalo de 10 a 20 horas de funcionamento, alcançando o valor de 161 W.

De acordo com os estudos feitos no LaMPaC, foi estimada uma potência de 165 W para um conjunto de 5 células com 80 mm de diâmetro. Dessa forma, a potência alcançada pelo protótipo está próximo ao valor esperado para uma pilha com cinco células. O sistema continuou funcionando por aproximadamente 100 horas.

11.3 Conclusão

A pilha a combustível é uma das principiais alternativas na busca de sistemas de geração de energia mais eficientes e com baixa emissão de poluentes. O desenvolvimento deste projeto permitiu a construção de dois protótipos de PaCOS com potências superiores a 100 W.

O protótipo de 100 W alcançou uma potência de pico de 115 W e o sistema se manteve estável por 50 horas com uma potência média de 50 W. O principal protótipo, formado por dois módulos contendo 2 e 3 células cada, funcionou plenamente por aproximadamente 10 horas, alcançando uma potência de 161 W. Embora o protótipo de 1 kW não tenha sido montado com todos os módulos calculados, a potência obtida foi muito próximo a estimada por meio dos estudos de otimização realizados em células botões.

Esses resultados comprovam a eficiência dos sistemas testados e validam a proposição de um sistema em série. Trata-se do primeiro protótipo nacional com empilhamento e potência gerada acima de 150 W, o que coloca o grupo LaMPaC e a Cemig como pioneiros na montagem e acionamento de pilhas do tipo óxido sólido no Brasil.

De posse desses resultados os próximos estágios a serem atingidos estão na utilização de etanol como combustível para as células, o que requer a elaboração de novos anodos para PaCOS. Também devem elaborados novos projetos de design e de fluxos térmicos e de gases que permitam o controle de temperatura e estanqueidade dos gases em protótipos de potências superiores.

Capítulo 12

Capítulo 12: Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético[12]

***Resumo*- Os países desenvolvidos vêm acenando para um futuro onde toda energia deve estar envolvida com a preservação do meio ambiente e com a sustentabilidade. Fontes alternativas de energia convergem para o problema do armazenamento e estocar energia na forma química vem despontando como a solução para este problema. O hidrogênio é o insumo químico com maior capacidade de armazenar energia, devido seu poder calorífico. A Cemig GT SA considerando a grande oportunidade de contribuir para a questão energética mundial, construiu um laboratório experimental visando desenvolver esta tecnologia, capacitar especialistas e quantificar os custos. Este artigo trata dos resultados do projeto de P&D Cemig/Aneel 050 – Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio. Esse projeto, juntamente com os trabalhos científicos desenvolvidos no tema indicam resultados promissores para o futuro dessa tecnologia.**

12.1 Introdução

Os países desenvolvidos vêm acenando para um futuro onde toda energia deve estar envolvida com a preservação do meio ambiente e com a sustentabilidade, tanto na sua geração como na sua utilização. Fontes alternativas de energia convergem para o problema do armazenamento e estocar energia na forma química vem despontando como a solução para este problema. O hidrogênio é o insumo químico com maior capacidade de armazenar energia, haja vista seu grande poder calorífico. Os sistemas que o utilizam, geralmente possuem melhores eficiências e menores emissões de poluentes. A utilização de tecnologia ligada ao hidrogênio visa basicamente contribuir para a solução da questão energética, e para tal é necessário que a sua utilização passe por um trabalho de racionalização e eficientização. Acredita-se que em um médio prazo acontecerá a transição entre a economia do petróleo e a economia do hidrogênio. O hidrogênio ainda poderia representar o elo entre o sistema de energia e o setor de transporte, aumentando a flexibilidade e a robustez do sistema de energia como um todo [1], [2].

Apesar de ser o elemento mais abundante em nosso planeta, o hidrogênio não existe de forma isolada no meio ambiente. Para obtê-lo são necessários processos químicos, tais como a reforma de vapor, a oxidação parcial de hidrocarbonetos, a eletrólise, o processo termoquímico. Processo de produção como, por exemplo, o fotobiológico, o fotoeletroquímico e outros, tiveram as pesquisas direcionadas recentemente para a produção de hidrogênio. Existe a expectativa de que os resultados tenham sucesso.

[12] SILVA, C. H. F. da; CARVALHO, A. M.; TÔRRES, E. S.. Publicado em IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Citenel, 2007, Araxá.

O processo eletrolítico é bastante conhecido. A proposta de construção do laboratório experimental visa não só o dimensionamento correto dos custos de produção do hidrogênio usando as diversas faixas de custo de energia elétrica, como o aprendizado e qualificação de mão de obra nessa tecnologia que é nova para a empresa. A aplicação desta tecnologia acarreta o armazenamento de energia excedente no sistema elétrico na forma química [3].

Este artigo apresenta os resultados do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 050 – Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio para uso como Vetor Energético.

12.2 P&D CEMIG/ANEEL 050

As primeiras discussões, na Cemig sobre o assunto hidrogênio podem ser encontradas em documentos internos que datam ainda da década de 1980. Em 1998 iniciaram-se estudos de viabilidade pela UNICAMP que resultaram na estruturação deste projeto [4]. O P&D CEMIG/ANEEL 050 se iniciou no ciclo 2000/2001 e foi encerrado em Maio/2006, tendo um custo total de R$1.595.692,19. Seus principais objetivos foram:

- Construção do laboratório experimental para produção de Hidrogênio, pelos processos: eletrolítico e de reforma de gás natural e derivados de petróleo;
- Capacitação e treinamento de mão-de-obra para produção e manuseio de Hidrogênio;
- Quantificação da energia consumida na produção de Hidrogênio;
- Análise da utilização do gás produzido como vetor energético e;
- Utilização do hidrogênio como fonte de geração distribuída (células combustíveis e grupos motores-geradores).

12.3 Resultados Obtidos

A. Construção do Laboratório de Hidrogênio

Foi construída uma edificação para abrigar o laboratório experimental do P&D 050. O local escolhido para a instalação foi a Usina Térmica de Igarapé, onde se dispõe de espaço físico e principalmente água desmineralizada e deionizada de altíssima qualidade produzida para alimentar a caldeira da Usina Térmica. Essas características da água contribuem, decisivamente, para a pureza do gás hidrogênio produzido.

O laboratório foi construído em uma área de 1354 m², delimitada por cerca de segurança, sendo 284 m² de área construída. A Figura 1 mostra a fachada do Laboratório de Hidrogênio. Após a aquisição dos equipamentos e periféricos, realizou-se a montagem do laboratório, conforme projeto, englobando os aspectos civis, mecânicos, elétricos, hidráulicos e pneumáticos.

Figura 1 – Vista geral do Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio da CEMIG, Juatuba/MG.

Atendeu-se à legislação ambiental, trabalhista e demais leis e normas aplicáveis [5]. Em Dezembro de 2006 o laboratório aprovou suas instalações pelo Corpo de Bombeiros e obteve o Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB). Em Maio de 2007 o laboratório recebeu a Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF) emitida pela FEAM/MG. No laboratório é realizada coleta seletiva de lixo. Os resíduos sólidos são descartados conforme Sistema de Gestão Integrada da Gerência das Usinas Térmicas. O esgoto doméstico é direcionado para sistema de fossas sépticas e o efluente líquido do laboratório para o sistema de tratamento de resíduos da Usina Térmica de Igarapé. As sinalizações de segurança são completas, informando proibições, exigências ou alertas necessários. Na ocorrência de vazamento de gases, em situação de emergência é emitido alarme sonoro para evacuação da instalação. Os vazamentos são detectados por detectores fixos de gases instalados nas salas onde existe possibilidade desta ocorrência. Os operadores do laboratório também contam com um detector de gases portátil, sensível a gases combustíveis e monóxido de carbono (CO). Em pontos chaves da instalação foram instaladas botoeiras para desligamento de emergência do processo de produção de hidrogênio. O material do piso feito foi escolhido de forma a não provocar faiscamento pelo atrito com os calçados de segurança. Foram avaliados os materiais construtivos da instalação, tendo-se o cuidado de escolher materiais resistentes à chama. Todas as salas possuem saída de emergência, portas corta-fogo e acesso a um amplo corredor, conforme é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio – corredor central.

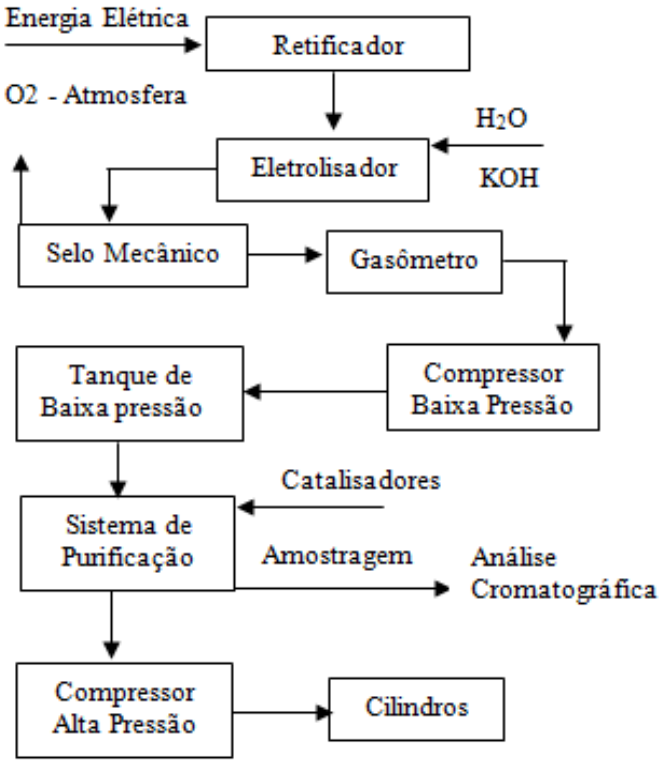
B. Produção de Hidrogênio via Eletrólise da Água Alcalina

Denomina-se eletrólise da água um processo eletrolítico particular onde os produtos finais das reações desenvolvidas são hidrogênio e oxigênio, e o balanço das reações químicas envolvidas resulta unicamente na decomposição de água [6], conforme (1).

$$H_2O \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 \quad (1)$$

O fluxograma do processo de produção de hidrogênio via eletrólise da água alcalina implantado no Laboratório encontra-se na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo de eletrólise.



Os eletrolisadores (Figura 4) trabalham com solução eletrolítica de hidróxido de potássio (KOH) com concentração de 30%. O uso desta concentração tem como finalidade aumentar o comprimento da ligação oxigênio-hidrogênio diminuindo assim a energia necessária para o rompimento da ligação química. Estabelecendo-se uma determinada diferença de potencial, quebra-se a molécula de água em seus átomos constituintes, que por sua vez irão formar os gases oxigênio (O2) e hidrogênio (H2) expressos na Equação (01). Esses gases provenientes da eletrólise saem do eletrolisador e passam por um primeiro sistema de limpeza de gases (Scruber), onde a solução eletrolítica arrastada é condensada e retorna ao eletrolisador. Os eletrolisadores foram especificados pela equipe de pesquisa e construído pela empresa Termoquip, possuindo as seguintes caracterís-ticas:

- Tipo Tanque Unipolar;
- Eficiência de 80 %;
- Tensão de operação: 1,9 Vcc;

- Corrente máxima: 12.000 A;
- Densidade de corrente: 1.500 A/m²;
- Área total de eletrodo: 8 m²;
- Consumo de água para eletrólise: 8 l/h.

Figura 4 – Eletrolisadores.

Em seguida os gases passam pelo selo d'água, assegurando uma pressão mínima de 30 cm de coluna de água, a partir de onde acontece o enchimento do gasômetro (Figura 5) pelo hidrogênio. O gás oxigênio é liberado para a atmosfera.

O armazenamento do hidrogênio no gasômetro se deve à necessidade de se estabelecer um fluxo constante de alimentação para o compressor de baixa (Figura 6), que por sua vez comprimirá o gás, armazenando-o em um vaso de pressão. O desinteresse no aproveitamento do oxigênio produzido se deve ao baixo valor comercial quando comparado ao custo de sua produção (geração, limpeza, compressão e armazenamento). A capacidade de produção é de 10 m³/h de hidrogênio.

Figura 5 – Gasômetro.

Figura 6 – Baixa compressão.

Após o sistema de baixa pressão, o gás passará pelo sistema de purificação, mostrado na Figura 7. Existe, neste circuito, um ponto de amostragem onde o gás será coletado para análise cromatográfica. Esta análise é realizada em um cromatógrafo Simple Cron da Cromacon Ciola equipado com *software* CSW 32 versão 1.4. Este equipamento composto basicamente por: uma válvula de 10 vias e 2 detectores, sendo um detector por ionização de chama (FID) e um detector por condutividade térmica (TCD). A Figura 8 mostra a sala de análises. A análise de traços de gases em hidrogênio, não é uma tarefa simples, sendo necessários procedimentos e métodos que assegurem a reprodutibilidade e confiabilidade das análises realizada, como apresentado em [7].

O arranjo da purificação permite expansão, se necessário, e também a purificação seletiva pela passagem do gás em leitos com catalisadores. Inicialmente, espera-se que existam alguns contaminantes como descrito a seguir:

- A vedação do gasômetro é feita por uma camada de água. Considerando que o gás produzido terá contato como a água, por difusão haverá contaminação por ela;
- Considerando que a atmosfera que envolve todo o sistema é rica em nitrogênio, existe possibilidade de ocorrência desse composto, bem como traços de oxigênio;
- Considerando que a vedação do gasômetro é feita por água, pode acontecer a queda de insetos nesta interface, resultando em traços de contaminantes com carbono.

A depender do contaminante o leito será preenchido com o catalisador adequado.

Figura 7 – Sistema de amostragem e purificação.

Figura 8 – Sala de análises e cromatografia.

Após o sistema de purificação compressor de alta (Figura 7) que finalizará o processo de produção de hidrogênio ao comprimi-lo no interior de cilindros de armazenamento de gás.

Figura 9 – Alta compressão.

C. Aspectos de Controle e Segurança do Processo de Produção de Hidrogênio

Para o controle e segurança do processo de produção do hidrogênio, automatizou-se toda a planta [8]. Foram instalados no laboratório sensores de: temperatura e nível de solução dos eletrolisadores, nível do gasômetro, pressão de hidrogênio em pontos críticos do sistema, presença de hidrogênio no ar nas salas do laboratório e presença de oxigênio na linha de hidrogênio, sendo que qualquer um deles, em determinada situação, pode enviar para a central de comando um sinal de parada do processo de produção ou apenas de alarme.

A equipe técnica que fará a operação do laboratório foi treinada no Laboratório de Hidrogênio do Instituto de Física "Gleb Wataghin" (IFGW). O treinamento contemplou a abordagem de temas como a manipulação e as técnicas de análise de gases ultrapuros com traços de contaminantes via cromatografia gasosa e em segurança no manuseio, operação e prevenção de acidentes em plantas industriais que trabalham com materiais tóxicos e inflamáveis. Estes treinamentos aconteceram em 3 etapas e treinou 4 engenheiros e 5 técnicos.

Além destes treinamentos, foram ainda realizados os cursos regulamentares relacionados às Normas Regulamentadoras nº 10 e nº13 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), treinamentos em CIPA e brigada de incêndio, técnicas de análise de risco industrial além de participação em congressos, seminários e workshops sobre o tema para atualização de conhecimentos.

Algumas características do hidrogênio que devem ser levadas em conta, considerando o aspecto de segurança são listadas a seguir [9], [10]:

- O hidrogênio é classificado pela norma NBR-7502 como pertencendo ao grupo de risco 2;
- É mais leve que o ar e quando liberado no ambiente tende a se deslocar para pontos mais altos, acumulando-se junto ao teto em recintos fechados. Mas, pode formar uma nuvem inflamável no ambiente caso não tenha por onde abandonar o meio;
- Em ambientes corretamente ventilados ele dissipa-se rapidamente;
- É incolor e inodoro, portanto, não é possível notar sua presença, são necessários sensores específicos;
- Possui chama levemente azulada, sendo na maioria das vezes incolor;
- Não é corrosivo;
- Não provoca envenenamento;
- Altamente inflamável;
- Alta densidade de energia por massa, três vezes mais do que a gasolina;

- Apresenta tendência a vazamentos;
- Alta velocidade de chama;
- Improvável que ocorra detonação em espaços abertos;
- O hidrogênio pode agir como asfixiante diluindo o oxigênio no ar. A inalação de ar com grandes quantidades de hidrogênio pode ocorrer sem que se note qualquer sintoma, como tonturas;
- Pequenas concentrações, insuficientes para provocar a inconsciência podem ser inflamáveis, portanto, todas as precauções que se tomam com qualquer gás inflamável devem ser também tomadas com o hidrogênio;
- O hidrogênio inflama-se ao ar numa larga faixa de concentração (de 4 a 75% em volume), entrando em ignição por faíscas, descargas elétricas, fagulhas, cigarro aceso, chamas, etc;
- O hidrogênio líquido e o gás frio proveniente do líquido podem produzir queimaduras semelhantes àquelas com temperatura alta, na pele, olhos e outros tecidos.

Desta forma, durante os trabalhos no laboratório, busca-se de forma permanente, a eliminação de fonte de ignição e a detecção de possíveis vazamentos, utilizando, para tal, equipamentos apropriados. Busca-se também a ventilação apropriada para os ambientes de forma a não criar atmosfera explosiva. Isto é obtido por ventilação natural e ventilação forçada, calculada conforme [11].

Foram adotados equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) aplicáveis e especificados segundo o SESMT da empresa. Estão sendo elaborados os procedimentos operacionais, incluindo um plano de atendimento à emergência, a serem seguidos durante a operação contínua do laboratório. Estas instruções estão sendo baseadas nas melhores práticas de mercado e norteadas especificamente por [12]-[13].

O laboratório possui maca para transporte de acidentados, kit de emergência, também especificado pelo SESMT da empresa, chuveiro de emergência e lava olhos, como na Figura 10.

Figura 10 – Chuveiro de emergência e lava-olhos.

D. Problemas de Montagem

Durante os testes e o comissionamento foram detectados alguns problemas de projeto e de montagem. A seguir serão descritos sucintamente os problemas ocorridos bem como a solução adotada:

- Montagem dos Eletrolisadores: A construção do equipamento foi feita pela TERMOQUIP, tendo sido feita uma pré-montagem em fábrica. Considerando-se a grande sensibilidade de alguns componentes a vibração, ocasionada pelo transporte, que poderia danificá-los, a montagem final foi feita nas instalações da CEMIG. Na primeira tentativa de montagem dos eletrolisadores, houve problemas durante a passagem das mantas de amianto pelos eletrodos. Após a detecção deste problema, foi reprojetada e reconstruída toda a estrutura de fixação das mantas aumentando a abertura para passagem dos eletrodos entre as mantas. Tal ação teve resultado satisfatório permitindo a continuidade dos trabalhos de montagem e posterior teste dos eletrolisadores;
- Vazamento no Fundo dos Eletrolisadores: Após enchimento dos eletrolisadores com solução eletrolítica, foram verificados pequenos vazamentos no fundo dos mesmos. Foi feita a desmontagem da tubulação de água bruta, água desmineralizada, oxigênio, hidrogênio, e das instalações elétricas. Os eletrolisado-

res foram esvaziados e erguidos para que fosse feito o reparo individual dos equipamentos. Esta foi uma atividade bastante complexa e de grandes riscos devido à movimentação de solução cáustica, de efeito tóxico e altamente corrosivo, bem como a possibilidade de acidentes com perdas materiais devido à possibilidade de danos aos eletrodos e isoladores durante a movimentação dos mesmos;

- Potência Instalada Inferior a Necessária para o Transformador de Alimentação: Durante o cálculo para dimensionamento foram utilizados apenas os números requeridos pelos eletrolisadores (tensão e corrente), desprezando a influência do fator de potência e do rendimento do retificador. Este problema foi detectado durante os primeiros testes funcionais do equipamento, realizados no final de 2004. Iniciaram-se, nesta mesma época, os trabalhos para atualização de projetos e substituição do transformador, o que ocorreu em meados de 2005. Contudo o transformador instalado foi incompatível com o especificado. O processo de substituição foi reiniciado e este transformador foi instalado em março de 2006;

- Tubulação de Saída dos Gases Mal Dimensionada: Durante os testes iniciais, realizados em novembro de 2004, foi verificado um arraste excessivo de solução, devido à posição da tubulação de saída de H_2 e O_2. Foi feita a substituição completa da tubulação originalmente construída com mangueiras de nylon, por tubulação rígida em PVC. O diâmetro da tubulação também foi alterado de ¾ de polegada para 1¼ de polegada. Foi feito também um acréscimo na distância de subida dos gases antes que os mesmos fossem interligados, (eletrolisador 1 e 2) reduzindo desta forma o arraste de resíduos líquidos pelos gases;

- Vazamento nos Vasos de Tratamento de Gás: Durante testes de estanqueidade realizados utilizando nitrogênio, foi detectado vazamento nas paredes dos vasos de tratamento. Estes vasos deveriam suportar a pressão de 1 MPa. Contudo, apresentaram vazamento à pressão de aproximadamente 0,2 MPa. Estes vasos foram reconstruídos, sendo aproveitados apenas os flanges dos mesmos. Foram feitos testes de estanqueidade pelo fabricante nos novos vasos de tratamento utilizando pressão de 1,5 MPa, conforme norma específica. Os vasos foram novamente testados pela Cemig após sua instalação local, utilizando nitrogênio a uma pressão de 1 MPa. Em ambos os testes os equipamentos apresentaram desempenho satisfatório;

- Compressor de Baixa Pressão: Inicialmente foi adquirido um compressor de uso odontológico (ar comprimido sem contaminação por óleo) para fazer a pré-compressão do hidrogênio. A pré-compressão consiste em transferir do gasômetro para o tanque de armazenamento de gás o hidrogênio, nas pressões 0,1 e 1 MPa respectivamente. Este compressor apresentou aquecimento anormal devido ao funcionamento contínuo e ao aquecimento provocado pela compressão do hidrogênio. A causa deste fato é que o aquecimento pela compressão do hidrogênio é maior do que o aquecimento pela compressão do ar. Compresso-

res isentos de óleo para grandes vazões são facilmente encontrados no mercado. Contudo, para vazão compatível com a demanda do laboratório (aproximadamente 20 m3/h), são raros e de preço elevado. Tendo em vista estes motivos, optou-se por adquirir um compressor originalmente utilizado para compressão de ar atmosférico, isento de óleo, adaptando-o para compressão de hidrogênio. Estas adaptações foram estudadas considerando-se os riscos inerentes à operação com um gás altamente inflamável como o hidrogênio;

- Travamento do Gasômetro: Durante os testes e início do processo de limpeza química ocorreu o travamento do gasômetro, que agarrava nas laterais devido a ovalização do mesmo e também devido à inclinação lateral da parte móvel. Quanto ao problema de ovalização da parte móvel, o gasômetro foi desmontado e desovalizado utilizando macaco hidráulico. Para verificar a solução do problema e acompanhar os trabalhos foram feitas medições de excentricidade durante o trabalho de enchimento/esvaziamento do gasômetro. Quanto ao problema de inclinação lateral da parte móvel, foram instalados três roletes uniformemente distribuídos pela circunferência do mesmo guiando seu movimento e resolvendo o problema.

E. Incorporação de Outros Projetos de P&D a Estrutura do Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio

O projeto P&D 008 – Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico a Hidrogênio e a Etanol Direto – foi iniciado em Fevereiro de 2000 e resultou no primeiro protótipo de célula combustível tipo PEM da América Latina, com potência de 1 kW, em parceria com: Clamper Indústria e Comércio, Unitech , Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI) e do Instituto de química da USP- São Carlos. A meta era produzir em escala pré-industrial uma alternativa eficiente de garantir formas limpas de geração de energia. Associando rendimento e confiabilidade, as células a combustível são em um médio prazo, uma das principais tecnologias de geração descentralizadas.

A estrutura do laboratório contempla uma sala disponível para a célula combustível onde (Figura 12) será feita a operação periódica desse equipamento, considerando a programação de mão-de-obra para tal e combustível obtido pela produção do laboratório. O funcionamento da célula a combustível é mostrado na Figura 13. O objetivo desta operação é avaliar o comportamento da célula e acompanhar qualidade do gás produzido.

A célula a combustível é uma tecnologia que utiliza a combinação química entre os gases oxigênio e hidrogênio para gerar energia elétrica, energia térmica e água [12]. As reações no anodo, catodo e global são apresentadas em (2) a (5). Onde Pt é platina, catalisador comum em células PEM.

Anodo: $H_2 + 2\,Pt \rightarrow 2Pt\text{-}H$ (2)

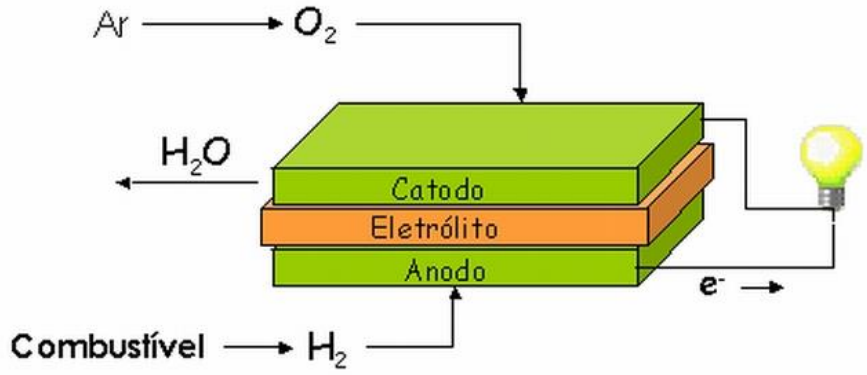
$2\,Pt\text{-}H \rightarrow 2\,Pt + 2H^+ + 2e^-$ (3)

Catodo: $\frac{1}{2}\,O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ (4)

Global: H_2 + ½ O_2 → H_2O (5)

Figura 12 – Célula tipo PEM no Laboratório de Hidrogênio.

Figura 13 – Esquema do funcionamento de uma célula a combustível unitária.



Alguns dos desafios relacionados a células a combustível estão associados com o custo e disponibilidade de catalisador e membrana polimérica, cujos temas serão desenvolvidos em projetos de P&D Cemig/Aneel, ciclo 2005/2006 em processo de aprovação pela Aneel.

Outro projeto que foi incorporado à estrutura do laboratório e será operado de forma contínua é o protótipo II resultante do projeto de P&D Cemig/Aneel 108 – Produção de Hidrogênio através Reforma de Etanol.

Os principais processos termoquímicos para produção de hidrogênio são: gaseificação de biomassa e pirólise, reforma a vapor, oxidação parcial, reforma autotérmica e reforma oxidativa. As matérias-primas que podem ser utilizadas na produção de hidrogênio através da reforma a vapor são o gás natural, metanol, gasolina e etanol. Entre as várias matérias-primas de origem fóssil ou renovável que podem ser reformadas destaca-se o etanol devido à sua origem renovável e, também, pela viabilidade termodinâmica da reação de reforma do etanol para a produção de hidrogênio. A reforma a vapor do etanol é interessante pelo fato do Brasil ser um dos grandes produtores mundiais de cana-de-açúcar, com domínio de produção e distribuição de álcool combustível.

A produção de hidrogênio através da reforma a vapor ocorre, basicamente, em duas etapas catalíticas, sendo que uma etapa ocorre em altas temperaturas "reações de reforma a vapor – *Steam Reforming Reactions* (SRR)" e a outra etapa em temperaturas mais baixas "reações de troca água-gás – *Water Gas Shift Reactions* (WGSR)".

Na primeira etapa há a conversão catalítica da mistura combustível/vapor d'água em um fluxo de gases de síntese que apresenta, geralmente, como produtos majoritários o H_2 e CO_2 e, como produtos secundários o CO, CH_4 e outros subprodutos que depende dos parâmetros de operação do processo de reforma. Além da reação de reforma a vapor uma outra reação que aparece na maioria dos sistemas de processo de reforma a vapor é a reação de troca água-gás – *water gas shift reaction* (WGSR). Esta etapa do processo remove parte do CO e produz hidrogê-

nio adicional através da reação catalítica reversível exotérmica entre o CO e vapor de água. Esta etapa do processo se torna necessário devido à quantidade de CO presente nos produtos dos processos de reforma a vapor e oxidação parcial e, principalmente, pelos limites de concentração de CO suportados por determinados tipos de célula a combustível. As células a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* - PEMFC) suportam no máximo 10-100 ppm de monóxido de carbono no fluxo de alimentação do ânodo, então, torna-se necessário remover o CO antes de promover a alimentação deste tipo de célula a combustível com o gás de síntese proveniente do sistema de reforma a vapor.
A reação global da conversão de etanol a hidrogênio indica a produção de 6 moles de hidrogênio a partir de 1 mol de etanol através da reforma a vapor, como mostra (6):

$$C_2H_5OH + 3H_2O \leftrightarrow 6H_2 + 2CO_2 \quad (6)$$

A Figura 14 mostra o fluxograma do processo de reforma e a Figura 15 mostra o sistema de reforma integrado ao Laboratório de Hidrogênio.

Encontra-se em processo de aprovação projetos para pesquisa de novas rotas catalíticas e melhoramento no sistema de reforma a vapor de etanol.

Figura 14 – Reforma de Etanol: Fluxograma.

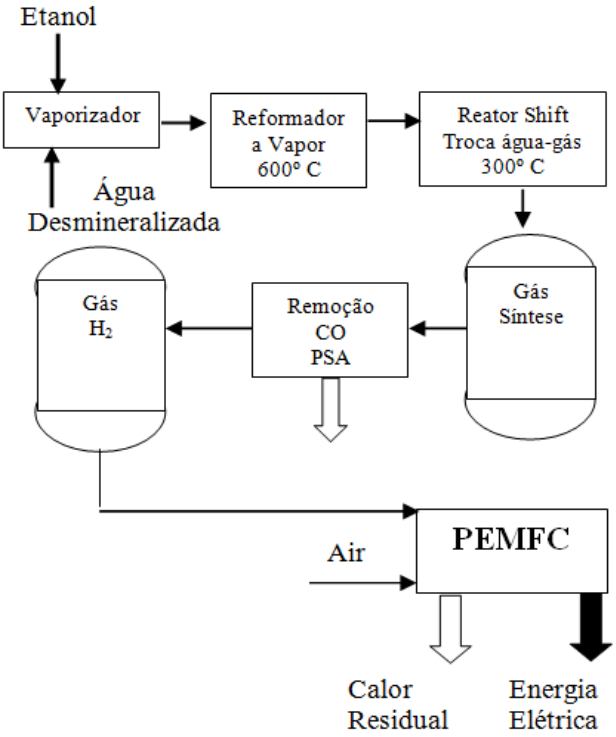


Figura 15 – Reformador de etanol e sua coluna de purificação – Laboratório de Hidrogênio.

12.4 Conclusões

A CEMIG GT SA pôde com este projeto: avaliar oportunidades de negócios; subsidiar ações estratégicas; capacitar técnicos para trabalhos associados ao hidrogênio e viabilizar pesquisas em geração distribuída.

O CENEH (Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – IFGW/UNICAMP) obteve o fortalecimento de seu grupo de pesquisa e reconhecimento como um centro de excelência nessa tecnologia.

O laboratório encontra-se montado, equipado em estágio de pré-operação experimental. Todos os equipamentos foram especificados e projetados pela equipe de pesquisa envolvida e sua a aquisição foi 90% nacional. A estrutura montada permite o desenvolvimento de novos projetos de pesquisa, podendo contribuir decisivamente para a implantação de fato das tecnologias do hidrogênio.

A Cemig desenvolveu competência para projeto, manuseio, segurança e operação de sistema com hidrogênio e pesquisas com células a combustível.

Pode-se perceber claramente que o projeto atingiu plenamente os objetivos propostos quanto à construção de uma unidade experimental, capacitação de pessoal para trabalho com hidrogênio, bem como atende aos requisitos de P&D Aneel. A qualificação, quantificação, análise de custos e utilização do gás como vetor ener-

gético e insumo químico estão sendo realizados dentro do projeto de P&D CEMIG/ANEEL - 181 – Produção de Hidrogênio no Laboratório Experimental.

O Laboratório incorporou também em suas atividades operativas a célula a combustível tipo PEM produzida dentro do P&D 008 e o reformador de etanol construído no P&D 108.

As tecnologias do hidrogênio são uma realidade e se mostram como uma importante opção na constituição do conjunto de soluções para a questão energética mundial.

Capítulo 13

Capítulo 13: Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Operação Experimental[13]

***Resumo*- O histórico da energia aponta para a descarbonização da fonte. Uma opção deste cenário é a chamada economia do hidrogênio, onde as fontes primárias produzem energia elétrica, calor e hidrogênio, com o uso de forma mais eficiente. O hidrogênio neste caso não é uma fonte e sim um vetor energético. Desta forma a Cemig GT SA construiu o laboratório experimental de hidrogênio, instalação localizada na UTE Igarapé em Juatuba/MG e realizou o Projeto de P&D Cemig/Aneel nº181 (Código Aneel 0049-135/2005). Neste artigo são apresentadas as atividades operativas realizadas, bem como as dificuldades encontradas. São também apresentados os resultados de análise de eficiência e de custo de produção de hidrogênio realizados dentro do projeto. As conclusões indicam que as dificuldades ainda são muitas e a necessidade de maiores pesquisas. Contudo o hidrogênio e suas tecnologias ainda se mantêm promissores para o futuro, dados os benefícios inerentes.**

13.1 Introdução

Nos últimos anos vem ocorrendo um grande interesse no conhecimento e uso do hidrogênio como armazenador de energia na forma química e seu uso como vetor energético, tanto na produção de energia elétrica via célula combustível, para uso como combustível em veículos, por se tratar de um combustível não poluente e de alto poder calorífico [1]. Outro campo de interesse é a utilização do hidrogênio na purificação do silício de grau metalúrgico para grau eletrônico, para produção de células fotovoltaicas.

O hidrogênio como vetor energético é concebido para ser utilizado principalmente em equipamentos que promovem uma reação eletroquímica entre o hidrogênio e o oxigênio, gerando energia elétrica, calor e apenas água como resíduo. Notadamente é claro o apelo ambiental deste sistema. Entretanto este vetor energético possui ainda as seguintes possibilidades de aplicação: combustível automotivo, enriquecimento de combustão, principalmente considerando-se gases pobres resultantes de processos de gaseificação, geração de vapor e propulsão para foguetes espaciais. Percebe-se também que este gás faz interface entre os sistemas de energia e o sistema de transporte, podendo representar uma grande oportunidade, abrindo um imenso mercado, mas trazendo consigo algumas questões que merecem ser mais bem tratadas, visto que participa de tecnologias de armazenamento e outros pilares das redes inteligentes ou *smartgrid*.

Apesar de ser o elemento mais abundante em nosso planeta, o hidrogênio não existe de forma isolada no meio ambiente. Para obtê-lo são necessários processos

[13] SILVA, C. H. F. da; MADUREIRA, A. J. V.; CARVALHO, A. M.. Publicado em Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Eletrica - Citenel, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

químicos, tais como a eletrólise alcalina da água e o processo de reforma. Alguns novos processos têm sido pesquisados e existe a expectativa de que os resultados tenham sucesso e também que consiga ter sucesso na ampliação de escala. De qualquer forma, é interessante lembrar que tal ação trata-se de um processo cuja eficiência é sempre menor que a unidade.

A proposta de construção do laboratório experimental visou não só o dimensionamento correto dos custos de produção do hidrogênio usando as diversas faixas de custo de energia elétrica, como o aprendizado e qualificação de mão de obra nessa tecnologia que é nova dentro dos negócios da empresa. Desta forma, o projeto consiste em produzir hidrogênio em alto grau de pureza, que será armazenado em cilindros de aço. Nesta produção, foram calculados os custos envolvidos no consumo de energia elétrica. Para tanto, estão instalados na planta de produção, um cromatrográfo que fará a análise qualitativa do gás. Estão instalados também, dois medidores de energia, sendo um para medir exclusivamente a energia consumida no eletrolisador e outro para medir a energia consumida em toda a instalação. As medições levaram ao custo e qualidade do hidrogênio. O hidrogênio produzido pelo processo de reforma de etanol, resultante do protótipo obtido no Projeto de P&D 108, encerrado em Agosto/2008 [2] também será qualificado em uma operação conjunta da instalação. A célula a combustível também será avaliada em sua operação, integrando a instalação e compondo o leque de tecnologias pesquisadas e operadas na instalação, desde a produção do gás hidrogênio até o seu uso em células a combustível [3].

A seção 15.2 apresenta um breve histórico do desenvolvimento desta pesquisa. A seção 15.3 apresenta o laboratório de hidrogênio. Na seção 15.4 encontram-se os resultados e principais discussões decorrentes da execução deste projeto. As conclusões do trabalho encontram-se na seção 15.5 e no encerramento do livro estão as referências bibliográficas para a elaboração deste artigo.

13.2 P&D CEMIG/ANEEL Nº 181

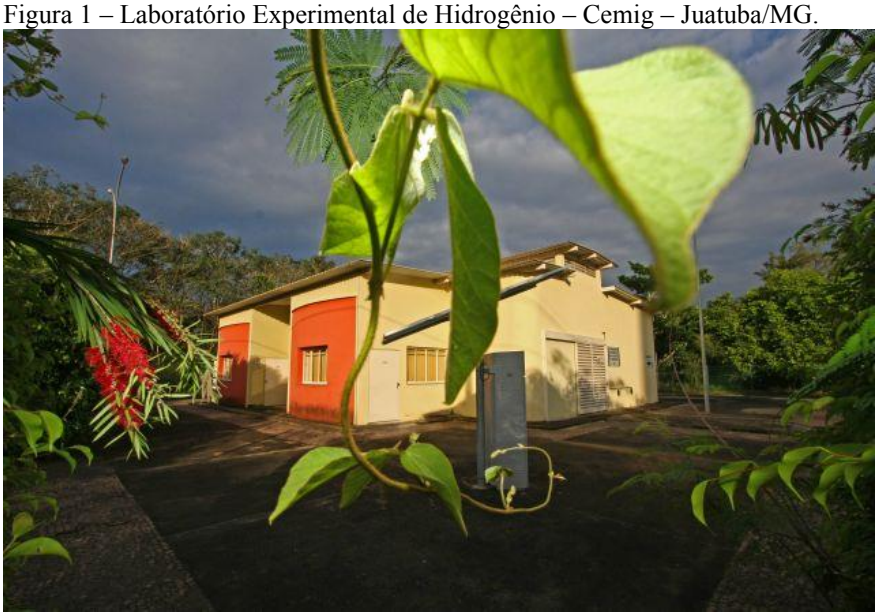
As primeiras discussões, na Cemig, sobre o assunto hidrogênio podem ser encontradas em documentos internos que datam ainda da década de 1980. Em 1998 iniciaram-se estudos de viabilidade pela UNICAMP que resultaram na estruturação do Projeto de P&D Cemig/Aneel nº 050: Laboratório experimental para produção de hidrogênio para uso como vetor energético [4]. A montagem da instalação foi concluída em Maio/2006, possibilitando assim o início da operação da instalação. A Figura 1 mostra a fachada do Laboratório de Hidrogênio da Cemig.

O P&D CEMIG/ANEEL 181 (Código Aneel 0049-135/2005) se iniciou no ciclo 2004/2005 e foi encerrado em Maio/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Geração e Transmissão SA e a Universidade Estadual de Campinas (IFGW/UNICAMP e Hytron). Seus principais objetivos foram:

- Produção de hidrogênio para ser utilizado como vetor energético;

- Qualificar e quantificar o gás produzido;
- Purificar, monitorar a qualidade do gás usando o processo de cromatográfica gasosa;
- Quantificar os custos do hidrogênio;
- Como objetivos secundários pode-se citar: quantificar a eficiência do eletrolisador utilizado no processo, mensurar o uso do hidrogênio como vetor energético via célula a combustível e analisar o uso do mesmo em outras aplicações;
- Disseminar e contribuir para o desenvolvimento e uso de energia elétrica via geração distribuída ou descentralizada de energia utilizando célula a combustível, que tem como combustível o hidrogênio.

Figura 1 – Laboratório Experimental de Hidrogênio – Cemig – Juatuba/MG.



A. Metodologia

A metodologia executada para se atingir o objetivo do projeto é apresentada a seguir:

- Levantamento de dados da planta instalada no Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio;
- Estudo dos equipamentos da planta e sua operação, bem como treinamento específico realizado na UNICAMP entre os dias 22 e 25/05/2007, através do curso: “Segurança em sistemas com hidrogênio” e “Análise de gases ultra purificados”, totalizando 40 horas de treinamento individual;
- Adequações técnicas na planta (sistema de cromatografia) e legais (NR’s 10 e 13);

- Operação da planta em etapas unitárias;
- Operação contínua da planta e de forma integrada, com trabalho em turno de revezamento por 36 horas;
- Participação no Seminário Internacional "2007 Fuel Cell Seminar & Exposition", realizado no Texas, EUA;
- Correção de falhas diversas que ocorram durante a operação, principalmente nos sistemas de retificação, cromatografia e eletrólise;
- Limpeza dos cilindros de hidrogênio;
- Análise de gases através de ensaios cromatográficos no CETEC e na UNICAMP e validação dos resultados de cromatografia do laboratório;
- Análises de consumo de energia;
- Operação da planta e compressão do hidrogênio produzido nos cilindros;
- Estudos do sistema de reforma de etanol;
- Estudos do sistema de produção de energia através de células a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*);
- Especificação e utilização do sistema de purificação;
- Análises de custo do hidrogênio produzido;
- Estudo da aplicabilidade da dissertação de mestrado de André Luis Furlan, desenvolvida dentro do projeto.

B. Benefícios do projeto

A meta final dos projetos de pesquisa e desenvolvimento Cemig/Aneel, em última análise, é a modicidade tarifária. Torna-se necessário que os projetos realmente ultrapassem as barreiras e se tornem de fato inovação, fechando o ciclo P&D&I (pesquisa, desenvolvimento e inovação), gerando produtos e serviços para a sociedade. Outras finalidades do programa estão relacionadas com o desenvolvimento regional, capacitação ao desenvolvimento tecnológico, fomento a pesquisa com a qualificação técnica-científica de pesquisadores, formação de mão-de-obra especializada e fortalecimento das instituições de pesquisa [6]. Notadamente o projeto alcançou em certa medida todas as diretrizes apontadas anteriormente para os projetos, mas de forma a ilustrar mais claramente são detalhados alguns itens a seguir:

- Através do projeto, foram possíveis: a operação do laboratório, a produção e a análise de hidrogênio como vetor energético;
- A produção de hidrogênio nos chamados "horários fora de ponta" e posterior utilização no "horário de ponta" podem trazer uma redução de custo na geração, uma vez que se trata de uma forma de armazenar energia vertida e não aproveitada;

- A Cemig tornou-se a concessionária de energia elétrica pioneira nesse tipo de estudo e o retorno deste projeto pode ser percebido na valorização e fortalecimento da marca Cemig;
- Os resultados do trabalho permitiram a participação dos membros do projeto em evento internacional e nacional, divulgando o nome da UNICAMP, da Hytron e da Cemig.

C. Principais dificuldades

As principais dificuldades associadas com este projeto foram:

- Dificuldades de se encontrar peças, componentes e equipamentos apropriados para o trabalho com hidrogênio;
- Dificuldade de se encontrar fornecedores e atrasos nas entregas de peças e equipamentos;
- Necessidade de adaptações e construção de peças e equipamentos customizados;
- Falhas constantes e de diversas naturezas no sistema de cromatografia;
- Equipe reduzida;
- Necessidade de ajustes e adequações diversas no laboratório.

Alguns destes itens e/ou as suas consequências foram responsáveis pelo atraso de cinco meses no desenvolvimento do projeto, resultando ainda em ações de reposicionamento de atividades.

Apesar de alguns países acenarem para uma condição em que o gás hidrogênio como vetor energético seja uma realidade próxima, uma cotação realizada em 2008 por técnicos da empresa indicam o contrário. Se existe tecnologia ela não se encontra facilmente disponível para o Brasil, principalmente pela ausência de garantias quanto à assistência técnica [5].

D. Incorporação de outros projetos ao Laboratório de Hidrogênio

Na operação do laboratório foram incorporados os seguintes projetos:

- P&D 008: Célula a combustível de polímero condutor iônico a hidrogênio e etanol direto. O protótipo de 1 kW foi incorporado à instalação e teve a sua operação realizada, principalmente durante algumas importantes visitas técnicas que ocorreram na instalação;
- P&D 108: Protótipo de reformador a vapor de etanol. Esse equipamento foi deslocado para a instalação considerando o final do P&D 108. Contudo, o mesmo encontrava-se desconectado e caberia ao pessoal da Cemig fazer a conexão e operação integrada do equipamento de forma a quantificar e analisar os gases produzidos. Foram finalmente levantados os dados necessários para o fechamento do projeto.

Considerando a natureza tecnológica da instalação e o desdobramento em diversos outros projetos na cadeia das tecnologias do hidrogênio, é natural que este Laboratório Experimental se torne a instalação agregadora dos desenvolvimentos obtidos nos outros P&D. A Tabela 1 apresenta os projetos de P&D Cemig/Aneel em hidrogênio e células a combustível (CaC) cujos desenvolvimentos são aguardados para compor as tecnologias disponíveis no laboratório de hidrogênio e para posicionamento estratégico da empresa com relação aos projeto de pesquisa nessa área [7].

Observando os projetos realizados, pode-se perceber claramente que a execução dos mesmos é feita de forma a resolver os gargalos científicos e tecnológicos dos diversos processos. Nota-se também que os mesmos se encontram alinhados com os investimentos mundiais na área [8],[9],[10],[11].

Tabela I – Projeto de P&D da Cemig nas tecnologias do hidrogênio.

P&D em Hidrogênio e CaC	09	10	11	12
Desenvolver a tecnologia PEMFC *Projetos em Andamento:* -GT228 – Nanotubos de carbono -GT232 – Membrana polimérica	X	X	X	X
Desenvolver a tecnologia de SOFC. *Projeto em andamento:* - 097 – Desenvolvimento de SOFC de 50 W *Projeto Previsto:* - GT 291 – Célula tipo SOFC de 1kW	X	X	X	X
Otimizar os sistemas para produção de hidrogênio por reforma de etanol *Projeto Previsto:* -GT 288 – Desenvolvimento de catalisadores para reforma de biomassa		X	X	
Desenvolver sistema para produção de hidrogênio de biomassa (biogás, glicerol, etc.) Projetos em andamento: -D237 – Gaseificação de biomassa e SOFC.	X	X	X	
Desenvolver sistema de combustão interna à hidrogênio *Projeto previsto:* GT 292 – Desenvolvimento de MCI movido à hidrogênio	X	X	X	X
Desenvolver aplicações em DLC para Células a Combustível *Projetos em Andamento:* -Cemig/Clamper/USP (Finep)	X	X	X	

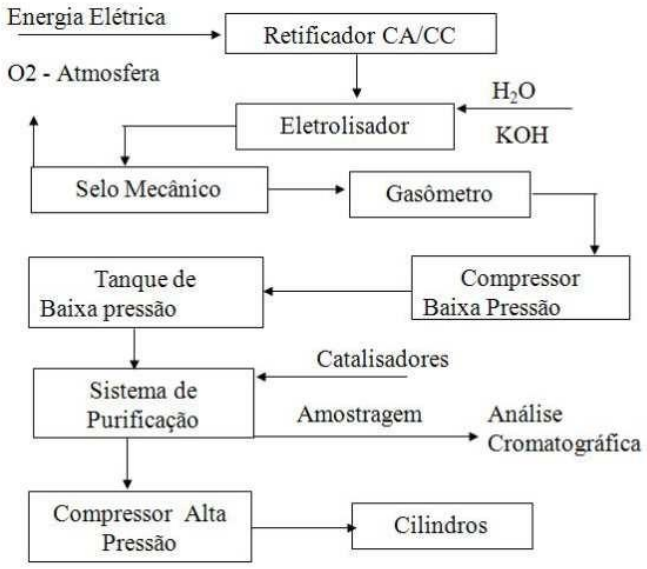
13.3 Resultados Obtidos

O Laboratório de Hidrogênio possui uma capacidade instalada de produção de 10 Nm^3/h de gás hidrogênio. Um esquemático simplificado do processo é mostrado na Figura 2.

A. Atividades Operacionais

Em Dezembro de 2006 o laboratório recebeu aprovou suas instalações pelo Corpo de Bombeiros e obteve o Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB). Em Maio de 2007 o laboratório recebeu a Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF) emitida pela FEAM/MG e com validade até 2011. No laboratório também é realizada coleta seletiva de lixo e os resíduos sólidos são descartados conforme Sistema de Gestão Integrada da Gerência das Usinas Térmicas. As sinalizações de segurança foram feitas à medida que se detectou a necessidade ou a regulamentação, informando proibições, exigências ou alertas necessários.

Figura 2 – Esquemático simplificado do processo de eletrólise.



Foram adotados equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) aplicáveis e especificados segundo o Serviço de Saúde e Medicina do Trabalho (SESMT) da empresa. Em diversos pontos da instalação existem sensores de presença de hidrogênio e os operadores do laboratório também contam com um detector de gases portátil, sensível a gases combustíveis (hidrogênio) e monóxido de carbono (CO). Existem ainda diversos pontos de parada de emergência do processo de eletrólise, que é o único que possui operação remota, através da sala de controle, mostrada na Figura 3.

Figura 3 – Sala de controle do Laboratório de Hidrogênio.

Os demais sistemas, por exigirem operação manual e local, não possuem esta exigência. O laboratório possui maca para transporte de acidentados, kit de emergência, também especificado pelo SESMT da empresa, chuveiro de emergência e lava olhos.

Durante o período de operação da instalação foi necessário que um representante do laboratório atuasse como empregado designado na Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA) e Brigada de Incêndio da UTE Igarapé. A atividade foi executada, incluindo os treinamentos exigidos por estas comissões.

Foram elaborados os procedimentos operacionais, incluindo um plano de atendimento à emergência, a serem seguidos durante a operação contínua do laboratório. Estas instruções foram baseadas nas melhores práticas de mercado, utilizando de todos os conhecimentos obtidos em treinamentos, literatura e normas obtidos durante o desenvolvimento deste projeto. Alguns dos principais documentos indicados foram [12]-[13]. A lista dos procedimentos operacionais (PO) criados para a operação do laboratório é dada a seguir:

- PO TE/LH-001 – Operação do cromatógrafo Simple Chrom, 14 páginas;
- PO TE/LH-002 – Atendimento a Emergências, 18 páginas;
- PO TE/LH003 – Operação da planta de produção de hidrogênio eletrolítico, 42 páginas;
- PO TE/LH 004 – Operação do reformador de etanol, 16 páginas;
- PO TE/LH 005 – Operação de células a combustível de 1 kW, 12 páginas.

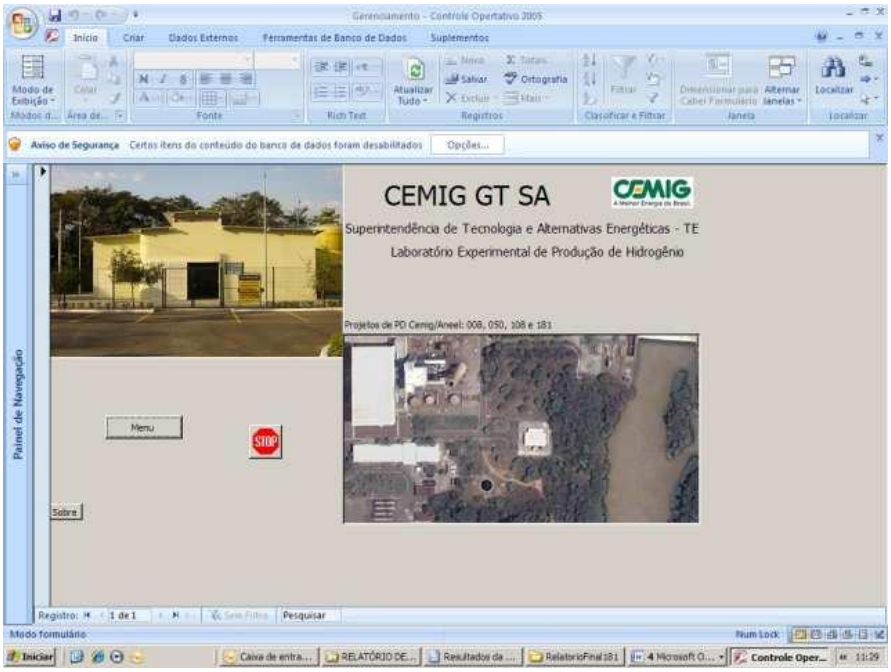
Para a execução das atividades de operação foram necessários outros estudos e documentos conforme indicados a seguir:

- Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) para o hidrogênio produzido. Considerando a possibilidade de transporte deste gás para ser utilizado como insumo químico se faz necessário o acompanhamento deste documento;
- FISPQ para o gás de síntese produzido no processo de reforma de etanol. Este documento é orientativo para a equipe de resgate em caso de acidentes;
- Análises de risco associadas às atividades de operação: na célula a combustível, no sistema de eletrólise, no sistema de reforma e no manuseio com cilindros;
- Sequência de manobras para partir e parar os sistemas: célula a combustível, eletrólise e reforma de etanol,
- Foi elaborado também um *software* em Access para acompanhamento das atividades de operação, cuja tela de entrada é indicada na Figura 4.

Através deste aplicado é possível realizar os seguintes acompanhamentos:

- Situação e controle de alarmes;
- Anotações gerais e avisos;
- Registro e controle de permissões para trabalho na área do laboratório e em equipamentos de processo;
- Controle dos gases;
- Operação do sistema de eletrólise;
- Operação do sistema de reforma;
- Operação da célula a combustível;
- Operação do sistema fotovoltaico;
- Medições e medidores de energia;
- Ocorrências ambientais;
- Incidentes de segurança;
- Registro de visitas.

Figura 4 – *Software* de controle operativo do Laboratório de Hidrogênio.



Além destes acompanhamentos foi realizado um estudo preparativo de adequação da instalação às exigências do sistema integrado de gestão corporativa (SIG). Tal estudo foi efetivado tendo em vista o levantamento de necessidades de adequações da instalação às exigências das normas internacionais ISO 9000, ISO 14000, OHSAS 18000, principalmente considerando-se a possibilidade de vender o gás hidrogênio para empresas certificadas do setor de gases. Tal situação era uma possibilidade prevista para ocorrer após o término do projeto, dando uma aplicação de insumo químico para o gás produzido. Deste estudo preliminar resultou um plano de manutenção, um plano de treinamento, lista mestra de documentos interno, lista mestra de documentos externo e na lista de registros.

Paralelamente à operação do laboratório, dentro do P&D 181 (Código Aneel 0049-135/2005) foi feito a elaboração de manuais de operação e manutenção do sistema de reforma de etanol e propostas de melhorias no sistema, juntamente com estudo de análise de custo de produção de hidrogênio e de assistência técnica para montagem e desmontagem do reformador, além de discussões acerca da interligação dos protótipos de célula a combustível tipo PEM de 1 kW e o sistema de reforma de etanol de 1 m³/h [14], [15], [16], [17].

B. Problemas Operacionais

A seguir serão descritos alguns problemas operacionais relevantes que ocorreram durante a execução do projeto [18].

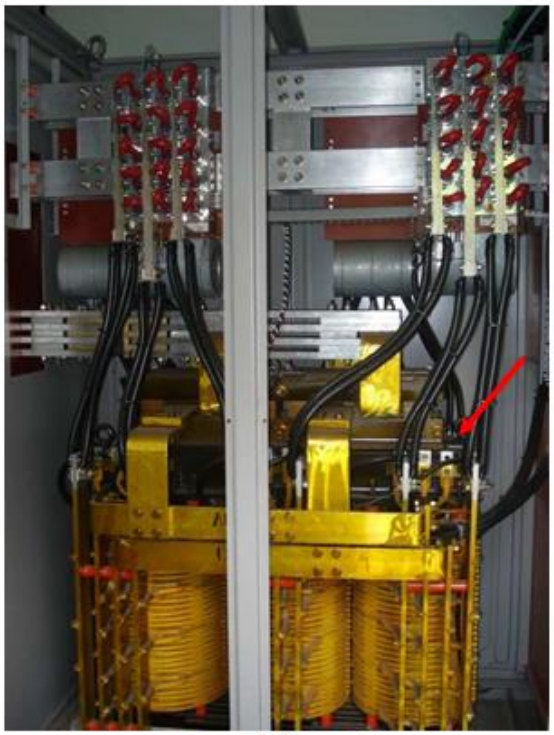
O retificador de corrente apresentou vários problemas desde o início das operações do laboratório experimental. Por diversas ocasiões foi necessária a manutenção do equipamento por parte do fabricante e, mesmo após as intervenções, o equipamento não funcionou a contento. Nos primeiros meses de operação o retificador apresentou a queima constante dos fusíveis de segurança, mesmo quando o equipamento estava sendo operado com baixas potências. Foram detectados e corrigidos problemas na linha de automação, passando por uma avaliação de que os fusíveis estavam subdimensionados. Outro problema diagnosticado no início das operações foi o aquecimento excessivo do retificador. Este problema é particularmente observado nos tirantes metálicos que realizam o fechamento das placas do transformador que chegam ao rubro em situações de temperatura ambiente elevada. Desta forma a operação do sistema deve ser realizada com as portas do cubículo, onde o retificador está instalado, abertas, de forma a aumentar a dissipação do calor. Nessa análise e operação foi concluído que a queima dos fusíveis era acarretada por falta de circulação de ar de forma adequada na sala. A Figura 5 indica os pontos críticos onde ocorreram os problemas no retificador

Os eletrolisadores, dimensionados e construídos especialmente para esta planta, apresentaram um desempenho pouco eficiênte em termos da produção de hidrogênio, uma vez que ocorreram diversos problemas durante o projeto, como se segue:

- As caixas dos eletrolisadores apresentaram vazamentos nas soldas que causou a necessidade de manutenção e dificultou em muito a entrada do sistema em operação, uma vez que a desmontagem de todo o equipamento é difícil e trabalhosa. Além disso, por se tratar de solução alcalina concentrada esta é uma operação de risco e de grande potencial de acidentes, sendo necessários todos os cuidados e precauções para realizá-la. Outros vazamentos ocorreram nos seguintes pontos: joelhos e juntas de PVC, do sistema de gases dos eletrolisadores, que precisaram ser substituídas por elementos de aço galvanizado;
- O sistema de controle de nível foi inutilizado, pois os sensores não resistiram à ação do hidróxido de potássio (KOH), foram realizadas substituições nos sensores, mas mesmo essa ação não produziu efeito. Desta forma construiu-se um sistema paralelo para verificação do nível, com mangueiras e controle visual, ou seja, verificação constante pelo operador do nível do eletrólito.
- Sem o controle automático do nível, ficaram sem utilização as válvulas automáticas utilizadas na tubulação de alimentação de H_2O para os eletrolisadores, sendo a realimentação feita com a operação de válvulas manuais.

.

Figura 5 – Problemas no retificador.



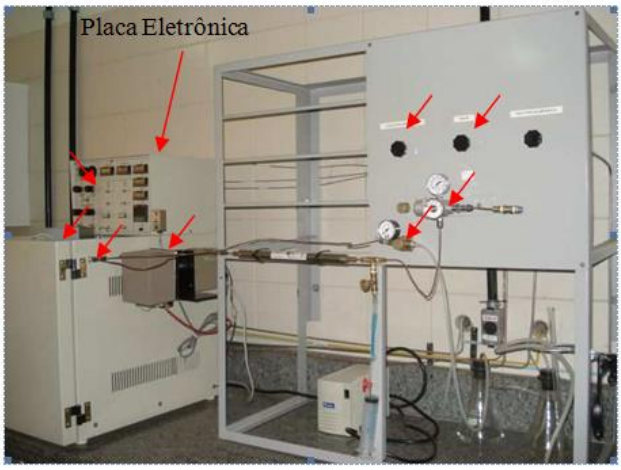
(a)

(b)

- Transbordamento do selo d'água foi um problema recorrente. Foram feitas consultas para discussão e solução do problema, foi sugerida a desmontagem para eventual limpeza dos "scrubbers", verificações sobre o nível o eletrólito e solucionamos o problema via procedimento. Para que não haja elevação repentina do nível do eletrólito, causada pela formação rápida de gás, o procedimento operacional deve ser de elevação lenta da corrente para o eletrolisador, ou seja, elevação de 2.000 em 2.000 A a cada 15 minutos.
- As válvulas de drenagem dos eletrolisadores, assim como o sistema alternativo de controle de nível, sofrem a ação constante do KOH e apresentam vazamentos que devem ser observados e sanados. A Figura 6 indica alguns dos pontos de vazamento.
- O cromatógrafo SimpleChrom da Cromacon Ciola instalado no laboratório com a função de qualificar o gás produzido foi de difícil operação. Tendo apresentado diversos defeitos e foi sendo em diversas ocasiões submetido a manutenções, inclusive na fábrica, mesmo assim ainda apresenta dificuldades para estabilização e leitura, tendo um funcionamento intermitente. O cromatógrafo em questão não é o instrumento mais indicado para as análises, uma vez que o limite de detecção não atinge na prática os valores necessários para se qualificar um gás hidrogênio com 99,99% de pureza, embora os resultados apresentados sejam semelhantes aos obtidos nas análises realizadas nos laboratórios do CETEC e da UNICAMP. Cabe ainda ressaltar que se trata de um equipamento chave para o processo e cujo funcionamento assegura que as medidas para a correta purificação do gás serão implementadas, além de certificar a qualidade do gás produzido. Para uma maior precisão das análises será necessária a troca do equipamento por um sistema de maior capacidade e melhor qualidade e agilidade nas análises. A Figura 7 mostra o equipamento indicando alguns pontos onde ocorreram problemas.

Figura 6 – Problemas nos eletrolisadores: vazamentos de solução e de gás.

Figura 7 – Problemas no cromatógrafo: vazamentos diversos e queima de componentes.



O leito de purificação teve efetivo funcionamento apenas o elemento para reação com oxigênio (paládio) e com sílica-gel para a eliminação de água. A equipe de pesquisa não conseguiu encontrar no mercado produtos químicos apropriados para a eliminação de nitrogênio e traços de carbono. Tais produtos serão necessários para o processo de purificação caso se deseje realmente um gás 4.0 ou acima. Para maiores purezas pode também ser necessária a montagem de um sistema criogênico com finalidade de aumentar a pureza do gás. Nesse caso poderia ser interessante a utilização do sistema pelo gás purificado originário na produção do sistema de reforma, utilizando-se assim o mesmo sistema para as duas linhas de produção. É importante ressaltar que o gás produzido no sistema de eletrólise pode ser usado diretamente na célula a combustível, pois não possui CO em sua composição, mesmo sendo um gás com pureza apenas industrial (98%). O grande interesse em se purificar o hidrogênio neste caso é para dar uma finalidade como insumo químico de alto valor agregado, uma vez que o gás industrial possui um valor de aproximadamente R$ 15,00 /m³ e o gás ultra purificado possui o valor na faixa de R$ 100,00-150,00/m³. Nota-se que o valor agregado é bastante significativo, contudo menor do que as dificuldades de implementações associadas a purificação.

Outro problema que necessitou ser resolvido foi o dimensionamento e a instalação de um banco de capacitores para a correção do fator de potência da instalação. Tal situação onerava bastante a conta de energia do laboratório por demandar muita energia reativa. O fator de potência foi corrigido pela instalação de um banco de capacitor de 110 kVA. Entretanto o mesmo necessitou ser ampliado para uma potência de 170 kVA devido efeito de harmônicos no sistema.

O medidor de energia exclusivo do processo também exigiu diversas paradas, para troca e programação a fim de atender ao processo de medição com objetivo e subsidiar a análise de custos de produção.

C. Eficiências e Custo de Produção

Após todas as adequações que se fizeram necessárias na planta, foi possível:

- Produzir hidrogênio pelo processo de eletrólise (o eletrolisador foi operado por aproximadamente 187 horas durante a execução do projeto);
- O sistema oxigênio (O_2) teve uma eficiência na redução deste contaminante na ordem de 99,5 %. Já para o elemento nitrogênio (N_2), a redução da contaminação foi de 26 %. No caso de elementos carbônicos detectado na cromatografia na forma de metano (CH_4) a eficiência esteve na faixa de 4,40 a 10,64 %. Tal variação ocorreu em função do tipo de zeólita utilizada no sistema de purificação;
- Qualificar o hidrogênio produzido. Através de análises cromatográficas foi possível caracterizar o hidrogênio produzido no laboratório. O teor médio de hidrogênio foi de 99,86 % e de contaminantes 0,002 % de O_2; 0,132% de N_2; 0,0022% de CH_4. Ensaios no Laboratório de Hidrogênio (IFGW/Unicamp) e no Cetec confirmam os resultados obtidos;
- Analisar o custo do hidrogênio produzido. Nas condições em que o sistema foi operado, obteve-se um custo para o hidrogênio de R$ 28,56/m³;
- Medir a eficiência elétrica do eletrolisador, que resultou em eficiência média de 48,15 %;
- A análise do custo de produção de hidrogênio em US$/kWh de poder calorífico inferior para o sistema de reforma de etanol, é muito influenciada pela variação dos preços dos combustíveis, responsáveis pelo fornecimento de calor para a reforma. Com os preços fornecidos, o menor custo de produção de hidrogênio ocorre com o uso de eletricidade e etanol, seguido do gás natural, gás liquefeito de petróleo. Os custos de produção de hidrogênio diminuem com o aumento do período de amortização do investimento e com a diminuição das taxas de juros. Observa-se, também, uma tendência de aumento das diferenças nos custos de produção de hidrogênio, com o reformador operando com eletricidade e etanol e o custo de produção de hidrogênio com o reformador operando com outras fontes de calor e etanol, conforme se aumenta as taxas de juros e com a diminuição do tempo de operação anual do sistema de reforma. O custo de produção de hidrogênio com o reformador operando com eletricidade e etanol é menor que o custo de produção de hidrogênio com o reformador operando com outras fontes de calor (respectivamente, etanol, gás natural e GLP) e etanol nas condições que ocorrem maiores custos ao sistema, com juros de 20 % anuais, 5000 horas anuais de operação e *pay-back* de 1 ano. Nas análises realizadas o custo de produção de hidrogênio por reforma de etanol ficou na faixa de USD0,431-0,850/kWh [12].

A Tabela II apresenta a situação dos cilindros relacionados com o gás produzido e sua qualificação ao final do projeto.

Tabela II – Conteúdo dos cilindros.

Amostras	Conc. de contaminantes % mol/mol			%Pureza
	O2	N2	CH4	
Cil. 1	0,00183	0,12000	0,00209	99,8761
Cil. 2	0,00150	0,11500	0,00208	99,8814
Cil. 3	0,00180	0,12667	0,00203	99,8695
Cil. 4	0,00086	0,12000	0,00213	99,8770
Cil. 5	0,00079	0,14500	0,00250	99,8517
Cil. 6	0,00101	0,13500	0,00234	99,8617
Cil. 7	0,00295	0,16500	0,00298	99,8291
Cil. 8	0,00119	0,12000	0,00214	99,8767
Cil. 9	0,00309	0,13000	0,00233	99,8646
Cil. 10	0,00200	0,13000	0,00202	99,8660
Cil. 11	0,00128	0,13500	0,00200	99,8617
Cil 12	0,00323	0,14500	0,00219	99,8496
Cil. 13	VAZIO	VAZIO	VAZIO	-
Cil. 14	VAZIO	VAZIO	VAZIO	-
Cil. 15	VAZIO	VAZIO	VAZIO	-

D. Capacitação

Capacitação da equipe técnica que atua no Laboratório através dos seguintes cursos:

- "Segurança em Instalações e Serviços de Eletricidade- NR 10 Básico", Escola de Formação e Aperfeiçoamento Profissional (EFAP) da Cemig, 2007;
- "Treinamento Complementar de Segurança na Operação de Processos - NR 13", EFAP, 2007;
- "Implementação de Metodologia para Análise de Gases e Procedimentos de Segurança na Operação de Sistemas que Utilizam Hidrogênio", UNICAMP, 2007;
- Participação em congressos: AGRENER (2006), IV Citenel (2006), WICaC (2006), 1º Encontro Brasileiro de Energia do Hidrogênio (2007), IWFC (2008), Fuel Cell Seminar & Exposition (2007) e Workshop de Célula à Combustível (2008), Congresso Internacional de Cooperação Industria Universidade (Unindu, câmara temática de tecnologias de hidrogênio no âmbito iberoamericano);

- Título de Mestrado: “Análise comparativa de sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica” defendida por André Luis Furlan, em 2008.

13.4 Conclusões

A CEMIG GT SA pôde com este projeto: avaliar oportunidades de negócios; subsidiar ações estratégicas; capacitar técnicos para trabalhos associados ao hidrogênio e viabilizar pesquisas em geração distribuída. Pôde-se participar de diversos fóruns técnicos, inclusive contribuindo com a experiência da Empresa nesta área dada pelos Projetos de P&D realizados. Além disso, diversos projetos encontram-se em andamento sobre as tecnologia de hidrogênio e espera-se que os resultados sejam agregados ao Laboratório de Hidrogênio, que se torna assim um espaço de demonstração tecnológica. Foi desenvolvida na Empresa competência para projeto, manuseio, segurança e operação de sistema com hidrogênio.

O CENEH (Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – IFGW/UNICAMP) obteve o fortalecimento de seu grupo de pesquisa e reconhecimento como um centro de excelência nessa tecnologia, além de ter produzido uma dissertação dentro do projeto.

O laboratório encontra-se montado, equipado e foi operado experimentalmente, dentro do P&D 181 (Código Aneel 0049-135/2005). Os objetivos do projeto na proposta deste P&D foram atingidos. Houve a produção de gás por eletrólise durante aproximadamente 187 horas e produção também por reforma de etanol. Além disso, houve também a operação da célula a combustível. O gás produzido por eletrólise possui uma pureza de 99,8 % com contaminação de 0,002 % de O_2; 0,132 % de N_2; 0,0022 % de CH_4. Os resultados detalhados para a operação do sistema de reforma podem ser encontrados em [19]. Toda a documentação necessária para a operação da instalação em termos de controle, segurança e registros foi realizada. O sistema de purificação foi utilizado obtendo sucesso na redução de oxigênio e água. O custo de produção de hidrogênio por eletrólise alcalina foi de R$ 28,56/m³. Os grandes problemas enfrentados durante a execução deste projeto foram relacionados com problemas técnicos associados com os equipamentos de eletrólise, de retificação e de análise cromatográfica. Destes, o sistema cromatográfico pode ser indicado como o mais problemático, principalmente em termos de sensibilidades, intermitência, defeitos e falhas de diversas naturezas e dificuldades de assistência técnica pelo fabricante. A instalação é objeto de visitação de pesquisadores e empresas interessadas em trocar de informações e desenvolvimento tecnológico.

As tecnologias do hidrogênio são uma realidade, com grandes dificuldades a serem enfrentadas, em projetos de maior dimensão, envolvendo ainda equipes multidisciplinares. Entretanto se mostram ainda como uma importante opção para um futuro de médio/longo prazo na constituição do conjunto de soluções para a questão energética mundial.

Capítulo 14

Capítulo 14: Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Análise Cromatográfica[14]

***Resumo*- O futuro da questão energética indica a possibilidade de uso do hidrogênio como vetor energético. Tal ação é baseada principalmente no argumento ambiental e do ponto de vista de eficiência energética. O uso do hidrogênio se dará em equipamento de transformação eletroquímica, chamado de célula a combustível. Desta forma a Cemig GT SA construiu o laboratório de experimental de hidrogênio, instalação localizada na UTE Igarapé em Juatuba/MG e realizou o Projeto de P&D 181 de operação desta instalação. A qualificação do gás hidrogênio produzido é de fundamental importância, principalmente considerando-se contaminantes orgânicos, que podem envenenar as células a combustível. Desta forma se faz necessário que os procedimentos de cromatografia sejam eficazes. Este artigo aborda a problemática envolvida na análise de gás do laboratório de hidrogênio, indicando o procedimento e principais resultados.**

14.1 Introdução

Há bastante tempo, o hidrogênio é uma matéria-prima importante na indústria química e de petróleo [1]. Este gás possui uso relevante na fabricação de amoníaco, hidrogenação de óleos combustíveis, indústrias de máquinas e eletrônica, mísseis, fornos, tratamento de metais e craqueamento catalítico.

A origem do interesse real pelo hidrogênio leva à corrida espacial da década de 1960 e a crise do petróleo na década de 1970. A busca por segurança energética, principalmente considerando-se o segmento de transportes e as preocupações com o aquecimento global tem levado a procura de alternativas ambientalmente amigáveis, socialmente corretas, econômica e tecnicamente viáveis. Nesse contexto a produção e uso de hidrogênio em células a combustível tem recebido um grande esforço de pesquisa, em âmbito mundial. O hidrogênio energético ainda pode ser considerado como uma visão de futuro, uma vez que o problema científico estabelecido não permite grandes avanços, principalmente porque existe, em alguns casos, a necessidade de desenvolvimento de novos materiais. A pesquisa e o desenvolvimento, em um horizonte de longo prazo, têm o trabalho de modificar o problema científico posto para se atingir novos patamares onde a tecnologia se viabilize. Existe amplo número de publicações que defendem a viabilização da economia do hidrogênio e, por outro lado, alguns autores que em sua argumentação procuram avaliar o hidrogênio energético de uma forma mais cética.

Apesar de ser o elemento mais abundante em nosso planeta, o hidrogênio não existe de forma isolada no meio ambiente. Para obtê-lo são necessários processos

[14] SILVA, C. H. F. da; MADUREIRA, A. J. V.; CARVALHO, A. M.. Publicado em Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Eletrica - Citenel, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

químicos, tais como a eletrólise alcalina da água e o processo de reforma. Alguns novos processos têm sido pesquisados e existe a expectativa de que os resultados tenham sucesso e também que consiga realizar a ampliação de escala [2].

O Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio da Cemig, resultado de diversas pesquisas, possui duas linhas de produção de hidrogênio. Uma por eletrólise alcalina da água [3] com capacidade de produção de 10 Nm³/h. E outra linha de produção de reforma de etanol [4] com capacidade de 1 Nm³/h. O processo de eletrólise já é conhecido industrialmente há bastante tempo, produzindo um gás naturalmente puro (99%, hidrogênio industrial) mas com elevado custo. A forma mais comum de se produzir o hidrogênio é através de processos de decomposição térmica e química, chamados de reforma.

Dentre as formas de produção consagradas, a produção de hidrogênio energético por reforma de combustíveis fósseis torna-se mais critica para o uso em células a combustível. Isto porque existe a possibilidade de contaminação de corrente de hidrogênio por monóxido de carbono. Este gás envenena severamente a célula a combustível, mesmo em frações bastante reduzidas (10 μmol/mol) [5]. Por isso se torna necessário um processo rigoroso de qualificação do gás produzido para fins energéticos.

Dentre os métodos modernos de análise, a cromatografia ocupa um lugar de destaque devido à facilidade com que efetua a separação, identificação e quantificação das espécies químicas, por si mesma ou em conjunto com outras técnicas instrumentais de análise [6]. A cromatografia é um método físico-químico de separação de componentes de uma mistura e, trata-se da forma apropriada de se analisar os contaminantes do hidrogênio ultra purificado.

A seção 14.2 apresenta o Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio e os processos de produção deste gás A seção 14.3 apresenta a metodologia desenvolvida e utilizada na análise cromatográfica na instalação. Na seção 14.4 encontram-se os resultados e principais discussões decorrentes das análises. As conclusões do trabalho encontram-se na seção 14.5 e no encerramento do livro estão as referências bibliográficas para a elaboração deste artigo.

14.2 Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio

A construção do Laboratório de Experimental de Hidrogênio da Cemig ocorreu dentro do Projeto de P&D Cemig/Aneel nº 050 [7]: A montagem da instalação foi concluída em Maio/2006, possibilitando assim o início da operação da instalação. A instalação foi construída em uma área de 1354 m², delimitada por cerca de segurança, sendo 284 m² de área construída. A Figura 1 mostra a fachada do Laboratório de Hidrogênio. Após a aquisição dos equipamentos e periféricos, realizou-se a montagem do laboratório, conforme projeto, englobando os aspectos civis, mecânicos, elétricos, hidráulicos e pneumáticos [8].

Figura 1 – Laboratório Experimental de Hidrogênio - Cemig – Juatuba/MG.

O protótipo de reformador de etanol foi agregado à instalação em agosto de 2006 e resultou do desenvolvimento do projeto de P&D 108 [9].

O P&D Cemig/Aneel 181, que trata da operação integrada da instalação, incluindo-se os processos de eletrólise alcalina e reforma de etanol, se iniciou no ciclo 2004/2005 e foi encerrado em Maio/2009, tendo como principais objetivos:

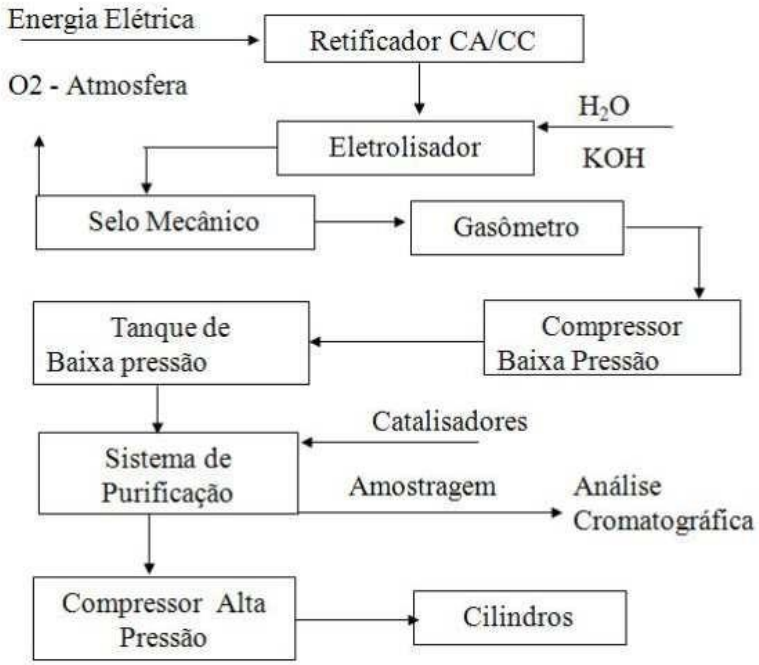
- Produção de hidrogênio para ser utilizado como vetor energético;
- Qualificar e quantificar o gás produzido;
- Purificar, monitorar a qualidade do gás usando o processo de cromatográfica gasosa;
- Quantificar os custos do hidrogênio.

A. Eletrólise alcalina da água

Denomina-se eletrólise da água um processo eletrolítico particular onde os produtos finais das reações envolvidas são o hidrogênio e o oxigênio, e o balanço das reações químicas envolvidas resulta unicamente na decomposição da água [10]. Um esquema simplificado do processo executado no laboratório é apresentado na Figura 2. O hidrogênio produzido possui uma pureza industrial e pode ser utilizado na célula a combustível diretamente. Entretanto, como o mercado de hidrogênio como transportador de energia ainda encontra-se nas fases iniciais, torna-se necessário adaptar a produção para as exigências de mercado estabelecida, e para isso busca-se aproveitar o nicho de maior valor agregado que se trata do gás com pureza 4.0, ou seja, 99,99%, ou acima. Cabe ainda lembra que as diversas aplica-

ções atuais de hidrogênio já definiram o seu valor de mercado. Tal valor não é compatível com o seu uso na forma energética em células a combustível, carecendo então de pesquisas, desenvolvimentos e inovações na busca de processos que viabilizem técnica e economicamente o uso deste gás na produção de energia.

Figura 2 – Esquemático do processo de eletrólise – P&D 181.



Neste processo, os principais possíveis contaminantes do gás produzido são:

- Nitrogênio, uma vez que tudo está envolto pelo ar, cuja maior fração é dada por esse gás;
- Oxigênio, originado por difusão no processo de eletrólise;
- Frações de material orgânico. Estes componentes podem entrar no processo principalmente por decomposição de insetos no selo d'água e no gasômetro, que na realidade trata-se de um reservatório aberto, cuja vedação para a atmosfera é feita com água. Esta decomposição resulta em compostos carbônicos que, por processos de difusão, são coletados pela fração gasosa dada pelo hidrogênio produzido. Outra forma desta contaminação são as reações entre o hidrogênio e o aço dos tanques e tubulações.

B. Reforma de etanol

A produção de hidrogênio através da reforma a vapor ocorre, basicamente, em duas etapas catalíticas, sendo que uma etapa ocorre em altas temperaturas "reações

de reforma a vapor – *Steam Reforming Reactions* (SRR)" e a outra etapa em temperaturas mais baixas "reações de troca água-gás – *Water Gas Shift Reactions* (WGSR)" [9]. Na primeira etapa há a conversão catalítica da mistura combustível/vapor d'água em um fluxo de gases de síntese que apresenta, geralmente, como produtos majoritários o H_2 e CO_2 e, como produtos secundários o CO, CH_4. A etapa WGSR do processo remove parte do CO e produz hidrogênio adicional através da reação catalítica reversível exotérmica entre o CO e vapor de água. As equações do processo são apresentadas em (1)-(5). Uma etapa posterior de purificação do gás produzido se faz necessário, considerando-se que as células a combustível do tipo PEMFC são envenenadas quando existe a presença de CO.

$$C_2H_5OH_{(g)} + 3H_2O_{(g)} \longleftrightarrow 2CO_{2(g)} + 6H_{2(g)} \quad (1)$$

$$C_2H_5OH_{(g)} + H_2O_{(g)} \longleftrightarrow 2CO_{(g)} + 4H_{2(g)} \quad (2)$$

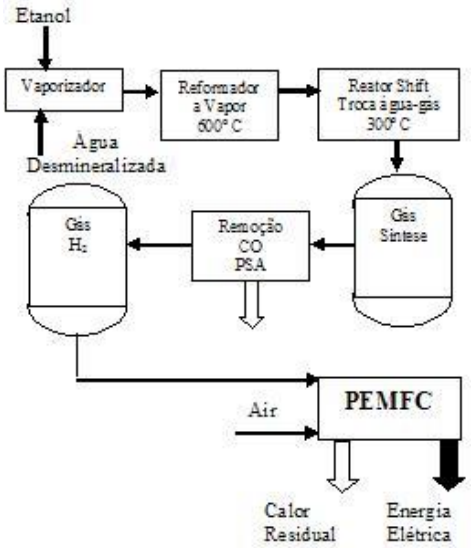
$$2CO_{(g)} + 2H_2O_{(g)} \longleftrightarrow 2CO_{2(g)} + 2H_{2(g)} \quad (3)$$

$$CO_{(g)} + 3H_{2(g)} \longleftrightarrow CH_{4(g)} + H_2O_{(g)} \quad (4)$$

$$CO_{(g)} \longleftrightarrow CO_{2(g)} + C_{(s)} \quad (5)$$

O estudo cinético leva a modelos onde para esse processo de reforma ocorrem mais de 30 reações simultâneas, gerando inúmeros produtos carbônicos, sendo os principais o dióxido de carbono, o monóxido de carbono e o metano, conforme indicam as análises cromatográficas dadas por [9]. Um esquema simplificado do processo de reforma é apresentado na Figura 3.

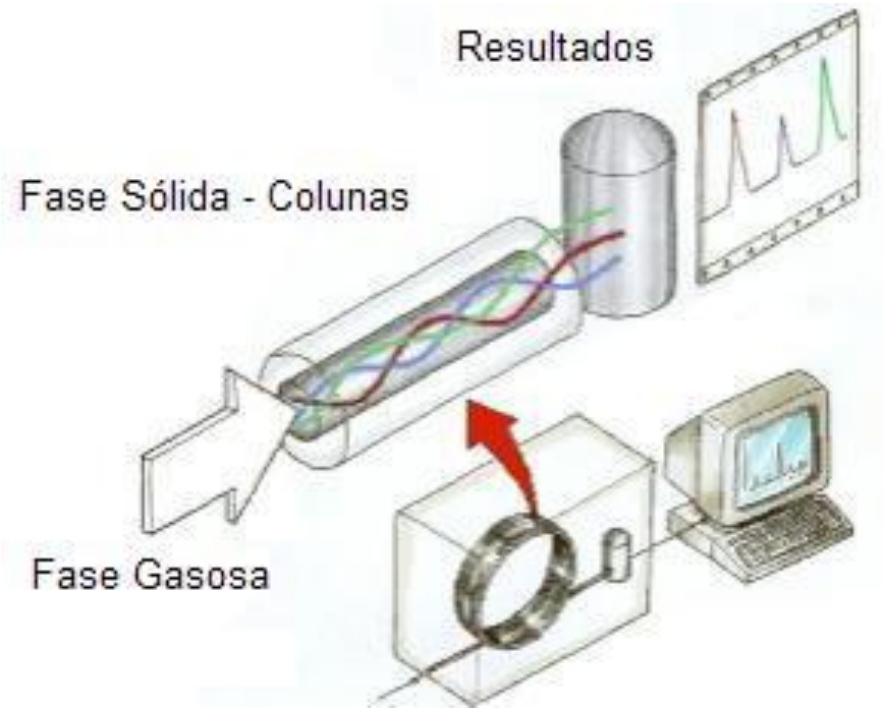
Figura 3 – Esquemático do processo de reforma – P&D 108.



14.3 Análise Cromatográfica

Gases ou substâncias voláteis podem ser separados utilizando-se a técnica denominada "cromatografia gasosa". A separação baseia-se entre uma fase estacionária (sólida ou líquida) e uma fase móvel (gasosa). A Figura 4 apresenta um esquema simplificado.

Figura 4 – Esquema ilustrativo da cromatografia gasosa.



A amostra, por meio de um sistema de injeção, é introduzida em uma coluna contendo a fase estacionária. O uso de temperaturas convenientes, no local de injeção da amostra e na coluna, possibilita a vaporização dessas substâncias, que de acordo com suas propriedades e as da fase estacionária, são retidas por tempos determinados e chega à saída da coluna em tempos diferentes. O uso de um detector adequado na saída da coluna torna possível a detecção e quantificação dessas substâncias [6]. A principal técnica utilizada no desenvolvimento de cromatografia gasosa é a eluição. Em um cromatograma ideal os picos apresentam-se separados e simétricos. Na prática, entretanto, pode haver sobreposição parcial devido separação deficiente, sendo inclusive parâmetros de avaliação de anormalidade na análise cromatográfica e que requer intervenção no sentido de melhorar condições operacionais.

Os detectores comumente utilizados para análises de gases desta natureza são: o detector por condutividade térmica (DCT) e o detector por ionização de chama

(DIC). O DCT é um detector de resposta universal, sensível à concentração e tendo como princípio de funcionamento a velocidade de perda de calor de um corpo. Já o DIC é de resposta quase universal, sendo sensível ao fluxo de massa. A queima do gás de arraste ioniza as moléculas de impurezas presentes gerando íons que produzem uma corrente da ordem de 10-14. Antes desta queima o gás passa por um metanador de forma a converter os compostos orgânicos à metano. Esse tipo de análise destrói a amostra.

Um importante objetivo do projeto era mensurar a qualidade e o grau de pureza do hidrogênio produzido. O controle de qualidade do hidrogênio energético se faz necessário não só como exigência para o funcionamento correto das células à combustível, mas especialmente em diversos pontos da produção, para que se evite a compressão de misturas potencialmente explosivas. No Brasil, ainda não existem normas de especificação do Hidrogênio Energético, embora a ABNT tenha constituído uma Comissão de Estudos Especiais que vem elaborando documentos nesse assunto.

Sob consultoria do Laboratório de Hidrogênio do Centro Nacional de Referencia em Energia do Hidrogênio (CENEH/IFGW/UNICAMP), foi desenvolvida e implantada no Laboratório Experimental de Produção de hidrogênio da Cemig a seguinte metodologia para a análise de gás hidrogênio, objetivando um produto ultra purificado:

a) Escolha dos parâmetros e métodos de análise;

b) Especificação e aquisição de cromatógrafo para análise de gases;

c) Adaptação do sistema de amostragem para análise de traços de gases;

d) Definição e otimização do sistema analítico;

e) Elaboração da curva de calibração;

f) Definição de amostragem e dos pontos de coleta de amostra;

g) Ensaios do hidrogênio produzido;

h) Testes de validação interlaboratoriais, usando como comparativos os resultados obtidos por análises do CENEH e da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC).

A. Parâmetros e métodos de análise

A norma internacional ISO 14687:1999 classifica o hidrogênio combustível em três tipos, conforme a Tabela I:

Tabela I – Classificação para o hidrogênio combustível.

Tipo	Descr.	Cat.	Aplicação
I	H_2 gasoso	A	Motores a combustão interna, células a combustível para transporte, dispositivos residenciais e comerciais.
		B	Combustível industrial para uso em geradores de energia ou fontes de aquecimento.
		C	Jatos e veículos especiais (com suporte de sistemas terrestres).
II	H_2 líquido	-	Jatos e veículos espaciais (requerem energia elétrica e propulsão *onboard*); veículos terrestres.
III	Lama	-	Jatos e veículos espaciais (produção *onboard*).

O hidrogênio produzido no Laboratório de Hidrogênio da Cemig tem o objetivo de ser utilizado como vetor energético, sendo sua conversão realizada através de células a combustível. Assim enquadra-se no Tipo I/A para o qual a norma ISO 14687:1999 define as características de qualidade conforme a Tabela II:

	Características	Tipo I/A	Tipo I/B
	Pureza do H_2	98,0	99,9
	Para-hidrogênio	NE	NE
Quantidade	Gases totais		
máxima de im-	Água (cm^3/m^3)	NCa	NC
purezas	Hidroc. Total	100	NC
(μmol/mol, ex-	Oxigênio	a	100
ceto a água)	Argonio	a	
	Nitrogênio	a	400
	Hélio		
	CO_2		
	CO	1	
	Mércurio		0,004
	Enxofre	2,0	10
	Partículas permanentes	f	e

Legenda da Tabela II:

NE: não especificado; NC: não deverá estar condensado; a – combinação água, oxigênio, nitrogênio e argônio: Máx. 1,9%; e – deverá ser acordado entre fornecedor e consumidor f – o referido hidrogênio não conterá poeira, areia, sujeira, cola, óleo ou outra substância em quantidade suficiente para danificar o equipamento da estação de abastecimento ou o veículo (motor) que está sendo abastecido.

Não foram objeto de análise as concentrações de mercúrio e enxofre. A existência de filtros imediatamente antes do processo de compressão final também eliminou a necessidade de análise de partículas permanentes.

O conteúdo de metano (único hidrocarboneto que poderia contaminar, com concentrações expressivas, o hidrogênio produzido) foi obtido usando um cromatógrafo gasoso equipado com detector de ionização por chama, calibrado intervalos apropriados através do uso de padrões gasosos.

As concentrações de nitrogênio e oxigênio foram obtidas usando um cromatógrafo gasoso equipado com detector de condutividade térmica, calibrado em intervalos apropriados através do uso de padrões gasosos.

O conteúdo de dióxido de carbono e monóxido de carbono foi obtido usando um cromatógrafo gasoso equipado com detector de ionização por chama e metanador, calibrado em intervalos apropriados através do uso de padrões gasosos.

A pureza do hidrogênio foi obtida através da subtração de 100% pelas impurezas obtidas através dos métodos analíticos recomendados.

A umidade não foi objeto deste trabalho, uma vez que a norma recomenda um método simples de verificação visual de líquido condensado ao liberar (vagarosamente) o conteúdo do cilindro.

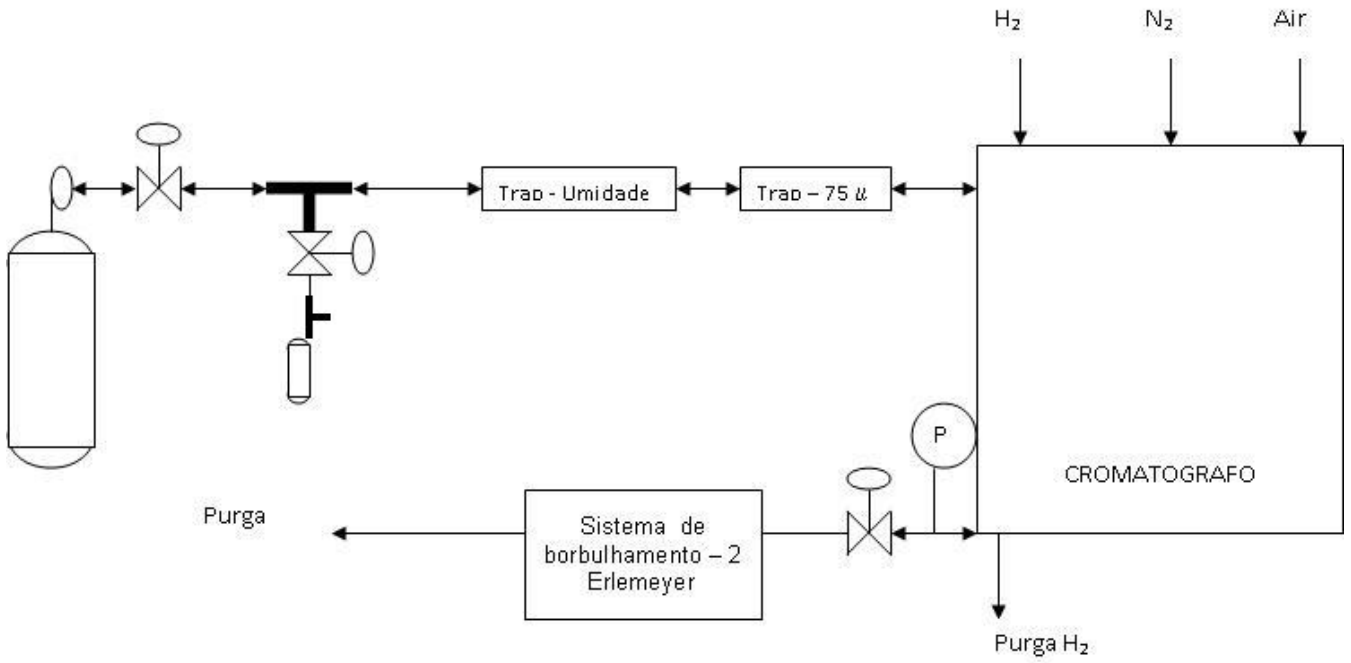
B. Especificação e aquisição de cromatógrafo para análise de gases

Sistema de cromatografia a gás para análise de misturas gasosas com componentes faixa 0 a 100 $\%mol.mol^{-1}$, constituídas por hidrogênio, hélio, argônio, oxigênio, nitrogênio, metano, monóxido carbono, dióxido carbono e outros gases inorgânicos e orgânicos leves para análise quantitativa de traços de oxigênio e de nitrogênio existentes em hidrogênio ultra puro com limite de detecção na faixa de 5 $\mu mol.mol^{-1}$ em amostras de 1 ml à pressão atmosférica, com possibilidade de injeção amostras de 1 ml à pressões de até 5 bar (pressão absoluta), com estabilidade térmica no forno de 0,01°C, detector ionização chama, detector condutividade térmica com make-up e troca digital de ganho, interface para comunicação, compartimento aquecido para válvula automática de 10 vias, sequência de fluxo em loop de 1 ml, coluna cromatográfica recheada com ms-5a, 60/80, 12 pés e coluna cromatográfica recheada com porapack n, 12 pés, *software* para operação e controle do cromatógrafo com aquisição de até 2 detectores.

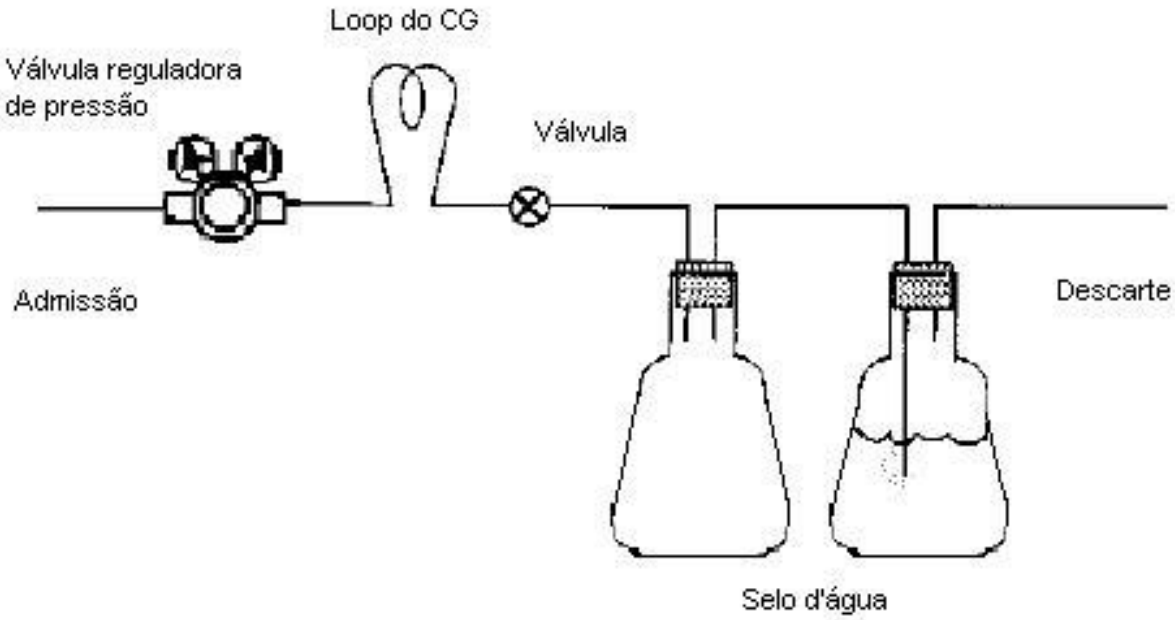
C. Adaptação do sistema de amostragem para análise de traços de gases

Para análise de concentrações menores, torna-se necessário a compressão da amostra no sistema de injeção. Dessa forma, aumenta-se a quantidade de mol de contaminantes a serem detectados em um mesmo volume amostrado. A válvula reguladora de pressão adaptada ao sistema admite regular a pressão de gás de entrada de 1 a 10 bar. A Figura 4 mostra a adaptação realizada no circuito.

Figura 5 – Adaptação para amostra pressurizada.



(a)


Loop do CG
Válvula reguladora
de pressão
Válvula
Admissão
Descarte
Selo d'água

(b)

D. Definição e otimização do sistema analítico

Para realização dos ensaios foi utilizado um cromatógrafo gasoso *Simple Chrom* usando a adaptação para amostras pressurizadas. Após testes, foram determinadas as seguintes condições:

- Gás de arraste: Hidrogênio 5.0 com fluxo de 30 mL/min;
- Gases auxiliares: Nitrogênio 4.5 com fluxo de 30 mL/min;
- Ar sintético 4.5 com fluxo de 300 mL/min;
- Colunas Porapak N e Peneira Molecular 13X;
- Injetor (válvula de 10 vias) 50ºC;
- DIC 180 ºC;
- DCT 110ºC;
- Forno 50ºC (isotérmico);
- Metanador a 350º C;
- Volume de injeção de 1,0 ml, a pressão manométrica de 2,0 bar.

E. Elaboração das Curvas de Calibração

Os padrões gasosos preparados "por pressão" pela UNICAMP foram utilizados na construção das curvas de calibração. Tais padrões foram feitos de forma customizada para a análise feita no Laboratório da Cemig. As medições foram realizadas em condições de repetitividade com 10 replicatas. Fez-se a correlação área e concentração e o ajuste da curva pelo modelo linear.

F. Definição da amostragem

Devido aos vários tipos de amostras e pontos de amostragem, foram utilizados os métodos de conexão de pontos da linha de produção diretamente ao aparelho analítico e amostragem em cilindro de armazenamento final de hidrogênio conectado ao aparelho analítico. Os bags e canisteres de amostragem também foram utilizados em alguns pontos e sob determinadas situações.

G. Ensaios do hidrogênio produzido

Cada amostra de hidrogênio produzido foi analisada em triplicata, conforme método implantado. As curvas eram avaliadas diariamente por meio da injeção de padrão ao início da rotina de análise.

H. Validação e testes interlaboratoriais

Limite de detecção e de precisão (em condições de repetitividade) foi determinado através de padrões com quantidades conhecidas dos compostos. Os testes interlaboratorias foram realizados através da análise de amostras através do método implantado e envio das mesmas ao Laboratório da UNICAMP. Durante as operações

iniciais da planta, considerando-se que a contaminação era significativa, foi utilizado um aparelho de Orsat para estimar a contaminação por oxigênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono.

14.4 Resultados Obtidos

A. Problemas ocorridos no processo

Durante o projeto de operação do laboratório, aconteceram diversos defeitos e falhas no sistema de cromatografia, que em certa medida foram diretamente responsáveis pelo atraso no projeto e para a obtenção de resultados. A lista a seguir descreve algumas das situações:

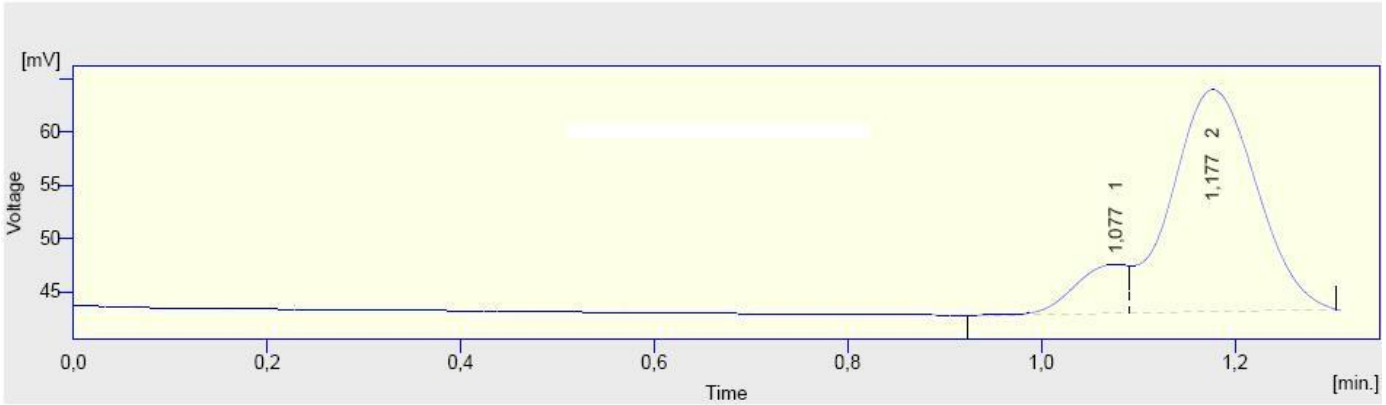
- Necessidade de adequação do sistema com nitrogênio para a operação da válvula de 10 vias;
- Quando da operação inicial, como o sistema de cromatografia esteve parado durante muito tempo entre a aquisição e a sua operação, houve contaminação das colunas, por processos de difusão de oxigênio oriundo do ar atmosférico. Desta forma tornou-se necessário a execução de procedimentos de condicionamento da coluna (procedimento de aquecimento e passagem de fluxo de gases a fim de expurgar a contaminação);
- Vazamentos em diversos pontos, sendo necessário que periodicamente se faça a checagem da estanqueidade do sistema. A presença de vazamentos, além de permitir a contaminação quando o sistema se encontra parado, ainda ocasiona desvios na qualificação e gera riscos de explosão. Para se evitar contaminação se faz necessário a passagem de gás de forma permanente pelo sistema. Tal atividade exige, além de alterações na central de gases para a operação de 2 cilindros, um controle rigoroso de gases para que não falte o gás de arraste, que nesse caso é o hidrogênio e, um criterioso sistema de segurança a fim de se evitar acidente devido a vazamentos de gases. Parte desta implementação foi executada apenas nas vésperas da realização de análises;
- Necessidade de adequação do sistema de cromatografia para análise de hidrogênio ultra puro com a instalação de um sistema de injeção externo de amostra;
- Houve situações onde a injeção direta na coluna apresentava resultados compatíveis, mas não funcionava se a injeção fosse feita via sistema de amostragem;
- Procedimento de condicionamento não atingindo a condição ideal exigindo a desmontagem da coluna para realizar um procedimento de maior temperatura fora do cromatógrafo;
- Ruídos de natureza elétrica e de forma intermitente. Existe a necessidade de uma revisão completa no circuito externo, a fim de se eliminar pontos de introdução de ruído no sistema elétrico do cromatógrafo;

- Dificuldades de estabilização da curva de base para análise;
- Dificuldades de reprodutibilidade nas injeções;
- Análises inconsistentes resultando em detecção ora sim e ora não;
- Queima de sensor de temperatura (PT100);
- Queima de controlador de temperatura;
- Queima de capacitores e resistores na placa eletrônica do cromatógrafo, indicando a qualidade inferior do equipamento;
- Queima de fusíveis;
- Queima de resistência de aquecimento;
- Substituição do loop de 1 mL por um de 10 mL para se avaliar se havia melhoria na detecção, fato que não foi confirmado;
- DIC e DCT inertes mesmo para injeções de concentrações elevadas.

Para alguns dos problemas buscou-se auxílio com os profissionais do laboratório de análises físico-quimicas da Cemig, CENEH, assistência técnica do fabricante. Em alguns casos, satisfatório e em outros não houve sucesso. A assistência técnica realmente foi executada de forma satisfatório através da empresa PHD Eletrônica. Durante uma das intervenções ventilou-se inclusive a possibilidade que o equipamento não poderia ser consertado. A Figura 6 indica alguns pontos onde ocorreram os problemas relatados. As Figuras 7 e 8 apresentam cromatogramas ilustrativos dos problemas encontrados.

Figura 6 – Problemas no cromatógrafo: vazamentos e queima de componentes elétricos e eletrônicos.

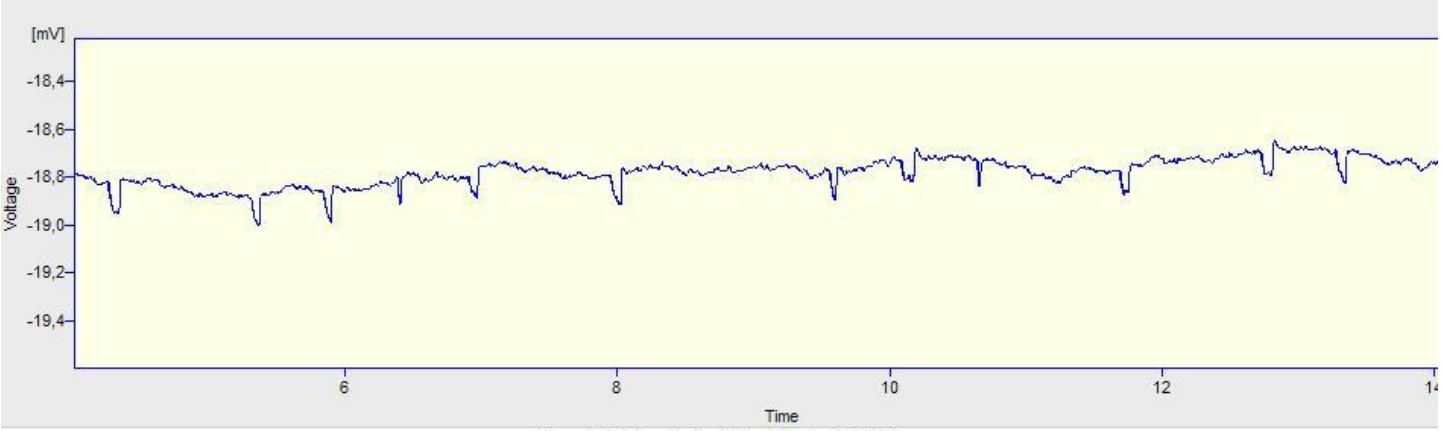
Figura 7 – Sobreposição de picos na fase de ajuste em 14/01/2008 (DCT).



Result Table - Calculation Method ESTD

Reten. Time	Area [mV.s]	Area [%]	Amount [ug/L]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
1,077	16,987	11,9	16,987	11,9		
1,177	126,293	88,1	126,293	88,1		
Total	143,280	100,0	143,280	100,0		

Figura 8 – Ruído excessivo causado por problemas eletrônicos no cromatógrafo – 05/03/2008 (DCT).



Result Table - Calculation Method ESTD

Reten. Time	Area [mV.s]	Area [%]	Amount [ppm]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
No peak to report						

B. Resultados de análises

Para cada um dos contaminantes analisados foram obtidos os resultados apresentados na Tabela III:

Tabela III – Resultados de análise dos contaminantes.

	O2	N2	CH4
Precisão (RSD)	9,3%	7,4%	2,6%
Limite de detecção	0,69 µmol/mol	34,3	0,11
Dispersão (teste interlaboratorial)	9,5%	2,3%	0,02%
Concentração típica do hidrogênio produzido	20 µmol/mol	1320 µmol/mol	22 µmol/mol

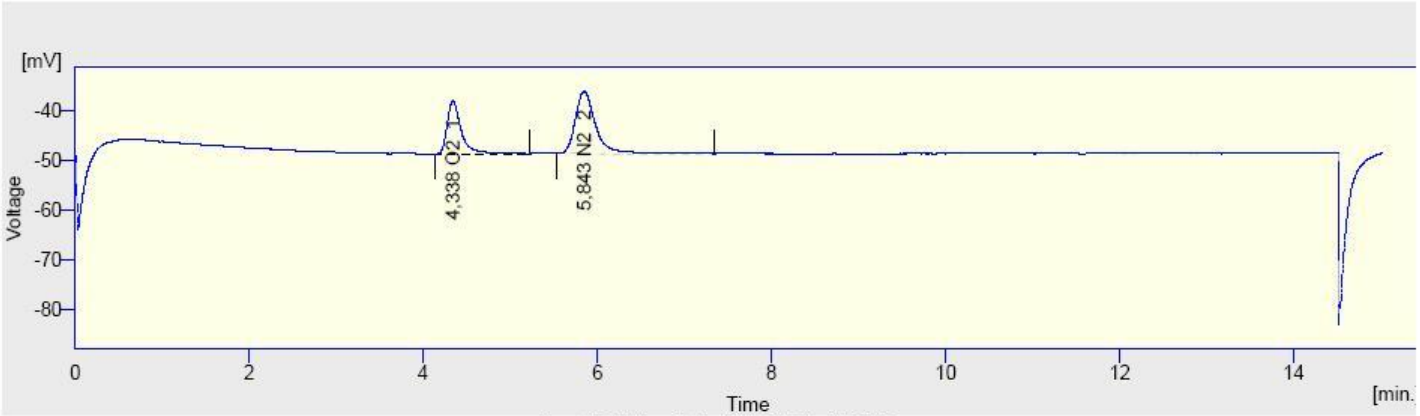
A curva para análise de O2 apresentou menor precisão, pois o sinal desta substância no DCT é muito baixo mesmo valendo-se da adaptação do sistema de amostragem. Entretanto a precisão obtida ainda é satisfatória, pois dependendo da complexidade da amostra são aceitos desvios de até 20%.

Os limites de detecção obtidos através do método implantado atendem tranquilamente as concentrações que se pretende determinar no hidrogênio energético para uso em células a combustível.

Os testes interlaboratoriais demonstraram que o método implantado apresentou bons resultados, entretanto a melhoria do método ficou limitada pelo baixo desempenho do cromatógrafo utilizado se comparado com outros equipamentos disponíveis no mercado.

As Figuras 9, 10 e 11 mostram cromatogramas válidos.

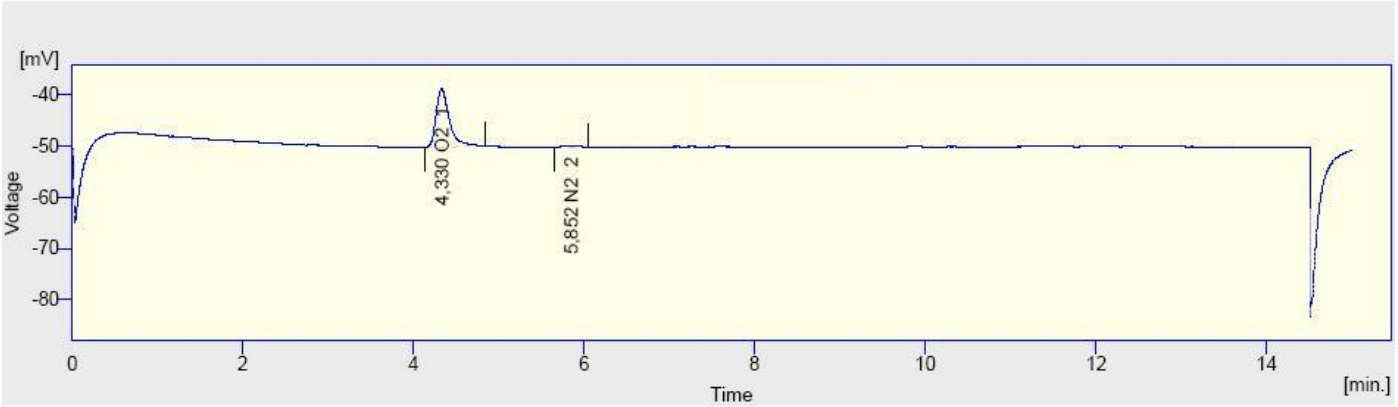
Figura 9 – Amostra do gasômetro 26/02/2008 - 0,17 % de oxigênio e 0,22 % de nitrogênio(DCT).



Result Table - Calculation Method ESTD

Reten. Time	Area [mV.s]	Area [%]	Amount [ppm]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
4,338	123,759	37,7	1,7e+03	43,7	Ordnr	O2
5,843	204,678	62,3	2,2e+03	56,3	Ordnr	N2
Total	328,437	100,0	3,8e+03	100,0		

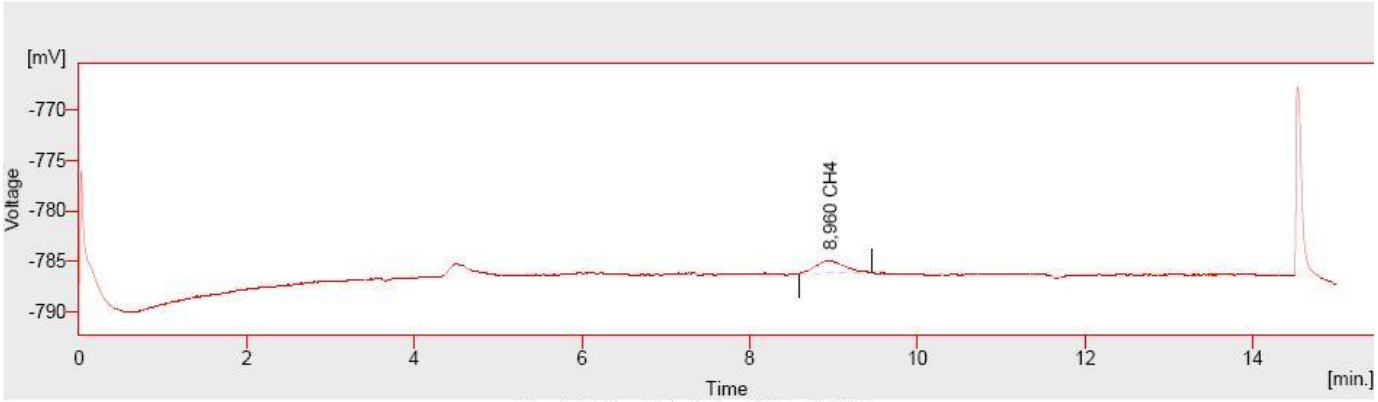
Figura 10 – Amostra coletada após o eletrolisador em 26/02/2008 - 0,17 % de oxigênio e 0,005 % de nitrogênio (DCT).



Result Table - Calculation Method ESTD

Reten. Time	Area [mV.s]	Area [%]	Amount [ppm]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
4,330	122,474	97,1	1,7e+03	97,1	Ordnr	O2
5,852	3,670	2,9	48,874	2,9	Ordnr	N2
Total	126,144	100,0	1,7e+03	100,0		

Figura 11 – Amostra do gasômetro 26/02/2008 - 0,0002 % de metano (DIC).



Result Table - Calculation Method ESTD

Reten. Time	Area [mV.s]	Area [%]	Amount [ppm]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
8,960	29,233	100,0	2,179	100,0	Ordnr	CH4
Total	29,233	100,0	2,179	100,0		

Em síntese, as análises cromatográficas realizadas auxiliaram tanto no desenvolvimento do projeto, através delas forma detectados falhas em equipamentos, assim como permitiu trabalhar com mais segurança, certificando-se que não havia formação de misturas explosivas no processo, sobretudo nos pontos de compressão do gás. Os resultados obtidos permitiram detectar o sistema de purificação como uma limitação da planta. Com o sistema de purificação instalado não seria possível obter um hidrogênio no 4.0, apesar disto o hidrogênio obtido atende perfeitamente o uso em células a combustível tipo PEM.

A Tabela IV apresenta a situação dos cilindros relacionados com o gás produzido e sua qualificação ao final do projeto.

Tabela IV – Conteúdo dos cilindros.

Amostras	**Conc. de contaminantes % mol/mol**			**%Pureza**
	O2	**N2**	**CH4**	
TQ10	0,47000	0,18000	0,00239	99,3476
Cil. 1	0,00183	0,12000	0,00209	99,8761
Cil. 2	0,00150	0,11500	0,00208	99,8814
Cil. 3	0,00180	0,12667	0,00203	99,8695
Cil. 4	0,00086	0,12000	0,00213	99,8770
Cil. 5	0,00079	0,14500	0,00250	99,8517
Cil. 6	0,00101	0,13500	0,00234	99,8617
Cil. 7	0,00295	0,16500	0,00298	99,8291
Cil. 8	0,00119	0,12000	0,00214	99,8767
Online após purificação	0,02210	0,16000	0,00524	99,8127
TQ10	0,51000	0,12500	0,00101	99,3640
Cil. 9 (SP)	0,57500	0,19500	0,00124	99,2288
Cil. 10 (SP)	0,59000	0,23500	0,00138	99,1736
TQ10 - D	0,77500	0,13000	0,00088	99,0941
Cil. 11	0,59000	0,31500	0,00145	99,0935
Cil. 12	0,65000	0,35000	0,00172	98,9983
Setex	0,00191	0,13500	0,00314	99,8599
Setex	0,00135	0,13000	0,00371	99,8649
Cil. 9 (NL)	0,00309	0,13000	0,00233	99,8646
Cil. 10 (NL)	0,00200	0,13000	0,00202	99,8660
Cil. 11 (NL)	0,00128	0,13500	0,00200	99,8617
Cil. 12 (NL)	0,00323	0,14500	0,00219	99,8496

TQ10 online	1,00000	0,11000	0,00069	98,8893
Cil. 13	1,15000	0,26000	0,00090	98,5891
Cil. 14	1,00000	0,22500	0,00068	98,7743
Cil. 15	1,00000	0,24500	0,00079	98,7542
TQ10 após sílica	3,65000	6,95000	0,00057	89,3994
Hidrogênio White	0,00013	0,00037	0,00004	99,9995
TQ10 após sílica	3,63333	4,93333	0,00083	91,4325
TQ10 bar(retirado sílica)	4,65000	0,75000	-	94,6000

14.5 Conclusões

O laboratório encontra-se montado e foi operado experimental dentro do P&D 181. Os objetivos do projeto na proposta deste P&D foram atingidos. Houve a produção de gás por eletrólise durante aproximadamente 187 horas e produção também por reforma de etanol. O gás produzido por eletrólise possui uma pureza de 99,8 % com contaminação de 0,002 % de O_2; 0,132 % de N_2; 0,0022 % de CH_4. O sistema de purificação foi utilizado obtendo sucesso na redução de oxigênio e água. A documentação necessária para operação e registros da análise cromatográfica foi realizada [15]. Os grandes problemas enfrentados durante a execução deste projeto foram relacionados com problemas técnicos associados com a análise cromatográfica.

A análise cromatográfica como um elemento fundamental na qualificação do gás hidrogênio ultra purificado exige mão-de-obra bastante especializada, principalmente considerando-se que o técnico que fará análises necessita ter conhecimentos e habilidades suficientes não só para a interpretação dos resultados como para o desenvolvimento de atividades necessárias às modificações inerentes ao processo. Tal habilidade se faz necessário principalmente objetivando-se certa autonomia em relação a assistência técnica de fabricantes, que se mostrou como um grande gargalo para este processo.

Capítulo 15

Capítulo 15: Produção de Hidrogênio Através de Reforma de Etanol[15]

***Resumo*- O atual cenário energético mundial e a perspectiva de crescimento de demanda, considerando-se os atuais níveis de crescimento econômico exigem a busca por novas fontes e formas de geração de energia. Neste contexto, as tecnologias de geração distribuída se mostram como boas opções. O uso do hidrogênio tem sido pesquisado intensamente. A reforma a vapor é um método de comprovada eficiência na produção de gases ricos em hidrogênio. No Brasil, é de bastante interesse a obtenção de hidrogênio via reforma de etanol pelo fato deste combustível ser renovável e ambientalmente mais limpo que os combustíveis fósseis. Além disso, o país já possui uma infraestrutura estabelecida, o que favoreceria o uso de hidrogênio em sistemas mais eficientes, inclusive abrindo campo para aplicação veicular. Este artigo mostra os resultados do Projeto de P&D Cemig/Aneel 108 – Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol. Os resultados indicam que a tecnologia é promissora.**

15.1 Introdução

Os crescentes danos ambientais associados aos processos de extração, processamento, transporte e utilização de combustíveis tradicionais têm levado a uma busca de alternativas energéticas renováveis que mitiguem esses danos e garantam o fornecimento de energia [1]. O hidrogênio, utilizado na indústria como importante matéria-prima gasosa, está sendo pesquisado para desempenhar o papel de vetor energético. Isso implica em produzir energia de fontes renováveis e armazenar grande parte dessa energia na forma química do gás hidrogênio, para utilização em sistemas de maior eficiência que os equipamentos tradicionais, chamados de células a combustível. A reforma a vapor é um processo catalítico provocado pela mistura reacional de vapor de água e hidrocarbonetos em uma temperatura elevada. O processo de reforma é amplamente conhecido na indústria química. Apesar do processo de reforma poder ser aplicada a qualquer hidrocarboneto, na prática industrial empregam-se somente hidrocarbonetos leves, como por exemplo, o metano [2]. Esse energético, contudo, possui como desvantagens uma alta toxidade e obtenção principalmente através de combustíveis fósseis. Entre os vários combustíveis que podem ser convertidos em hidrogênio, o etanol apresenta grande viabilidade, considerando-se a facilidade de decomposição na presença de vapor de água e de gerar uma mistura rica em hidrogênio. No Brasil, por ocasião da crise do petróleo na década de 1970, foi criado o "Pró-Álcool". Esse programa buscava a substituição do uso de combustíveis fósseis por álcool. Para tal foi montada toda a infraestrutura de produção, transporte e comercialização, reconhecida hoje como uma ação de vanguarda na busca de alternativas energéticas. Percebe-se no mo-

[15] SILVA, C. H. F. da; MADUREIRA, A. J. V.; TÔRRES,E. S.; CARVALHO, A. M.. Publicado em V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Eletrica Citenel, 2009, Belém.

mento um grande interesse internacional para implementação da experiência brasileira em outros países. O fato é que em função da popularização e estrutura que o etanol possui no Brasil ele pode também contribuir na realização da economia do hidrogênio. A pesquisa sobre o uso de hidrogênio aponta para algumas grandes barreiras a serem vencidas, como por exemplo: reduzir o custo de produção, aumentar a eficiência do uso em células a combustível, desenvolver novos materiais para catalisadores e armazenamento. O etanol pode ser visto como uma forma liquida de armazenar hidrogênio de maneira fácil e com tecnologia dominada. O etanol seria então convertido em hidrogênio quando necessário, em células a combustível, com seu uso direto ou pela aplicação de reformadores. A análise termodinâmica da reforma a vapor de etanol mostra que a reação é possível em temperaturas entre 900 e 1000 ºC [3]. A temperatura de reação pode ser reduzida pelo uso de catalisador, que também pode contribuir na melhor eficiência do sistema. O atual status de funcionamento de células a combustível exige que o gás hidrogênio utilizado seja relativamente puro, e principalmente, isento de monóxido de carbono. Esse composto químico é altamente prejudicial ao funcionamento de células a combustível, envenenando-a e levando ao término da sua operação.

Este artigo apresenta os desenvolvimentos realizados em reforma de etanol e indica as tendências para a pesquisa futura, tendo como referência, o projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 108 – Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol.

15.2 P&D CEMIG/ANEEL 108

O P&D CEMIG/ANEEL 108 se iniciou no ciclo 2002/2003 e foi encerrado em Agosto/2008, tendo um custo total de R$639.583,48. Resultou da parceria entre a Cemig Geração e Transmissão SA e a Universidade Estadual Paulista "Julio Mesquita" (UNESP/Guaratinguetá). Seus principais objetivos foram:

- Estudar os componentes do reformador, identificando os diversos parâmetros para projeto;
- Desenvolver protótipos nacionalizados;
- Disseminar e contribuir para o desenvolvimento da geração distribuída.

Este projeto proporcionou:

- A obtenção de experiências e conhecimentos em reforma de etanol e uso de hidrogênio com vetor energético;
- Capacitou recursos humanos, através da formação de um mestre em ciências e divulgação dos resultados do projeto em seminários de transferência tecnológica;
- Promoveu a interação de diversas instituições de pesquisa;

- Gerou publicações científicas com participações em diversos fóruns de discussão, além de contribuir significativamente para o reconhecimento do Grupo de Otimização de Sistemas de Energia da UNESP/Guaratinguetá;
- Resultou no pedido de patente do protótipo desenvolvido.

15.3 Resultados Obtidos

A metodologia adotada para execução deste projeto pode ser resumida nas etapas mostradas a seguir [1]:

- Estudo de bibliografia disponível;
- Análise termodinâmica de sistemas reformadores de etanol;
- Caracterização e preparação de catalisadores para reforma de etanol;
- Estudo de dimensionamento de componentes para o sistema;
- Dimensionamento de protótipos de reformadores;
- Construção e ensaios experimentais no protótipo I;
- Análise do protótipo I e construção do protótipo II;
- Ensaios experimentais no protótipo II e dimensionamento do sistema de purificação;
- Construção do sistema de purificação e testes experimentais no sistema de reforma – protótipo II.

O projeto resultou na construção de dois protótipos. O protótipo I encontra-se nos laboratório do Grupo de Otimização em Sistemas de Energia – Unesp/Guaratinguetá. O protótipo II, cujas descrições detalhadas serão apresentadas a seguir está instalado e operando para testes no Laboratório de Experimental de produção de Hidrogênio da Cemig, situado em Juatuba/MG, região metropolitana de Belo Horizonte, dentro da área industrial da Usina Térmica de Igarapé.

Os tipos de reações que dominam a produção de hidrogênio por reforma são: a reforma a vapor (SR), a oxidação parcial (POX) e a reforma autotérmica (ATR).

A oxidação parcial do etanol é um processo exotérmico onde a reação do combustível primário ocorre com uma quantidade insuficiente de oxigênio gerando uma combustão incompleta. As Equações (1)-(2) apresentam as reações para combustão incompleta e combustão completa respectivamente. Entretanto a eficiência global do sistema pode estar sujeita a requerer energia devido a perdas de calor no processo. Esse processo é conduzido em temperaturas superiores à do processo de reforma a vapor. O reator para esse processo costuma ser mais compacto, com tempos de respostas mais rápidos e com ampla faixa de inflamabilidade da mistura.

$$C_2H_5OH + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow 2CO + 3H_2 \;\; \Delta H^0_{298} = 14{,}05 kj/mol \quad (1)$$

$$C_2H_5OH + \tfrac{3}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O \;\; \Delta H^0_{298} = -1277 kj/mol \quad (2)$$

O processo de reforma a vapor é o processo mais empregado para a produção de hidrogênio em escala industrial. Trata-se de processo catalítico em mais de uma etapa, endotérmico e que promove a conversão de uma mistura de hidrocarboneto e vapor de água. Como principais vantagens para o uso desse tipo de reforma pode-se citar: o alto rendimento da produção de hidrogênio, não exige planta de oxigênio no local, apresenta menor risco de inflamabilidade. A desvantagem desse processo é o fato dele ser endotérmico, resultando em um maior gasto energético.

O processo de reforma autotérmica é uma combinação dos processos de reforma a vapor e oxidação parcial, resultando num processo onde a oxidação parcial, que é exotérmica, supre a energia para o processo de reforma a vapor, que é endotérmico. Torna-se necessário para obtenção de resultados satisfatórios que o processo sofra um rigoroso controle da quantidade de oxigênio na entrada da mistura.

A produção de hidrogênio através da reforma a vapor ocorre, basicamente, em duas etapas catalíticas, sendo que uma etapa ocorre em altas temperaturas "reações de reforma a vapor – *Steam Reforming Reactions* (SRR)" e a outra etapa em temperaturas mais baixas "reações de troca água-gás – *Water Gas Shift Reactions* (WGSR)" [4]. Na primeira etapa há a conversão catalítica da mistura combustível/vapor d'água em um fluxo de gases de síntese que apresenta, geralmente, como produtos majoritários o H_2 e CO_2 e, como produtos secundários o CO, CH_4 e outros subprodutos que dependem dos parâmetros de operação do processo de reforma. A etapa WGSR do processo remove parte do CO e produz hidrogênio adicional através da reação catalítica reversível exotérmica entre o CO e vapor de água.

A Equação (3) mostra a reação global envolvida no processo de reforma, onde o etanol reage com água formando dióxido de carbono e hidrogênio. É interessante ressaltar que, para cada mol de etanol utilizado são previstos, teoricamente, a produção de 6 moles de hidrogênio. A reação de reforma, etapa endotérmica do processo, é apresentada em (4). Pode-se observar que nesse caso os produtos formados são o monóxido de carbono e o hidrogênio. Na sequência, (5) apresenta a reação de troca água-gás. Essa etapa é exotérmica e ocorre em baixas temperaturas. Essa etapa se faz necessário, bem como uma etapa posterior de purificação do gás produzido, considerando-se que as células a combustível do tipo membrana trocadora de prótons (PEMFC) são muito sensíveis à presença de monóxido de carbono, em torno de 10 µmol/mol. Esse composto químico desativa os sítios catalíticos responsáveis pela reação eletroquímica que gera a energia elétrica nas células a combustível. Muitas reações químicas podem ocorrer simultaneamente numa reação de reforma. Dentre elas, podem ser destacadas: a reação de formação de metano, mostrada em (6) e a reação de Bouduard, mostrada em (7).

$$C_2H_5OH_{(g)} + 3H_2O_{(g)} \longleftrightarrow 2CO_{2(g)} + 6H_{2(g)} \quad (3)$$

$$C_2H_5OH_{(g)} + H_2O_{(g)} \longleftrightarrow 2CO_{(g)} + 4H_{2(g)} \quad (4)$$

$$2CO_{(g)} + 2H_2O_{(g)} \longleftrightarrow 2CO_{2(g)} + 2H_{2(g)} \quad (5)$$

$$CO_{(g)} + 3H_{2(g)} \longleftrightarrow CH_{4(g)} + H_2O_{(g)} \quad (6)$$

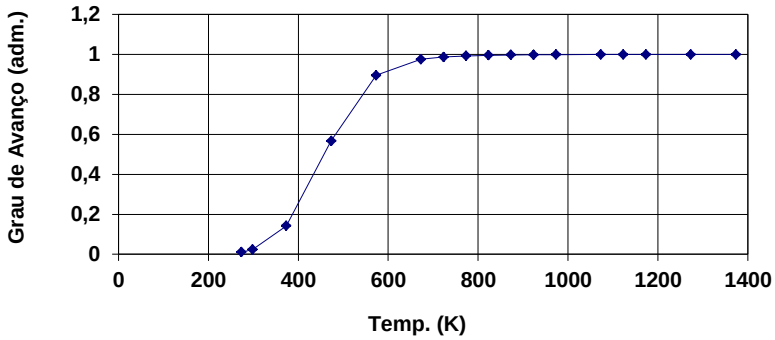
$$CO_{(g)} \longleftrightarrow CO_{2(g)} + C_{(s)} \quad (7)$$

Dentre os estudos necessários para o projeto de sistema de reforma, destaca-se a análise termodinâmica. A seguir são mostrados nas Figuras 01 e 02 os comportamentos do sistema, relacionando o grau de conversão com a temperatura e a pressão respectivamente [6]. A Equação 6 apresenta a relação entre a constante de equilíbrio (K) e a temperatura (T), onde R é a constante universal dos gases e H é a entalpia. Na Equação 7 é mostrada a relação entre o grau de avanço (α) e a pressão e, a relação entre grau de avanço e a fração de hidrogênio (x_{H_2}) . Esse estudo leva a definição das condições operacionais favoráveis para a maior formação de hidrogênio, sendo então adotadas para condições de projeto e operacionais a temperatura de 973 K e 0,1 MPa.

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H^0}{RT^2} \quad (6)$$

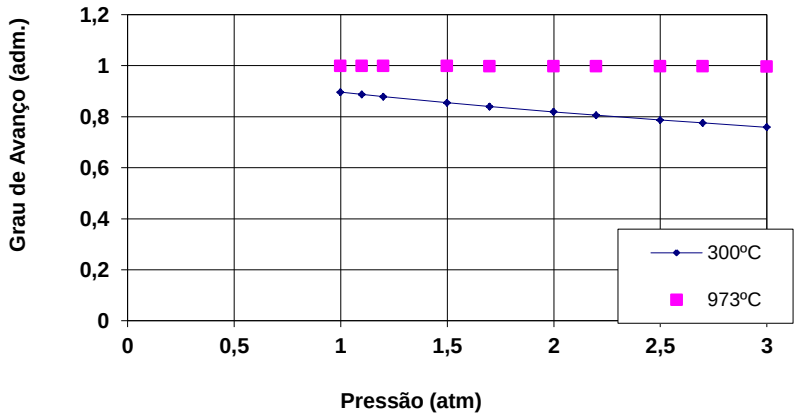
$$\alpha = \frac{\sqrt[8]{K}}{\sqrt{\sqrt[4]{K}} + \pm\sqrt[4]{27P}}, \qquad x_{H_2} = \frac{3\alpha}{2(1+\alpha)} \quad (7)$$

Figura 1 – Grau de avanço de reação x Temperatura (0,1 MPa) [6].



O estudo catalítico indicou como catalisador para testes iniciais no protótipo o NiCu/γ-Al_2O_3 [7]. O leito catalítico possui um volume útil de aproximadamente 1,63 l, totalizando uma massa de suporte de 1.222,5 g de γ-Al_2O_3 (suporte). A massa de precursores, para catalisadores, necessária é de 363,48 g de nitrato de níquel e 278,79 g de nitrato de cobre [8]. De maneira semelhante foi feita a análise termodinâmica, resultando na indicação da temperatura de 220 º C e pressão de 0,1 MPa como condição operacional para o reator *Shift*.

Figura 2 – Grau de avanço de reação x Pressão [6].



O catalisador proposto para este sistema é o CuZnO/γ-Al_2O_3. O volume desse reator é de aproximadamente 3,1 l comportando uma massa catalítica de 1,97 kg. A parte estrutural dos protótipos foi executada pela empresa Termoquip e a elaboração dos catalisadores, bem como as análises cromatográficas, foram feitas pelo Laboratório de Hidrogênio (IFGW/Unicamp).

As Figuras 3 e 4 mostram as entradas e saídas dos reatores de reforma e de Shift. A Figura 5 mostra um esquema de funcionamento integrado do sistema de reforma.

Figura 3 – Reator de reforma.

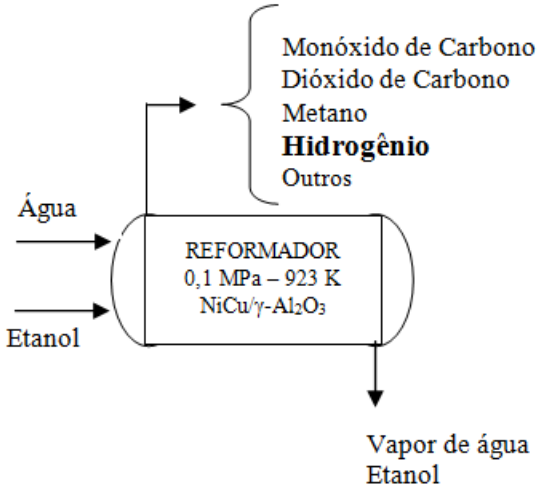
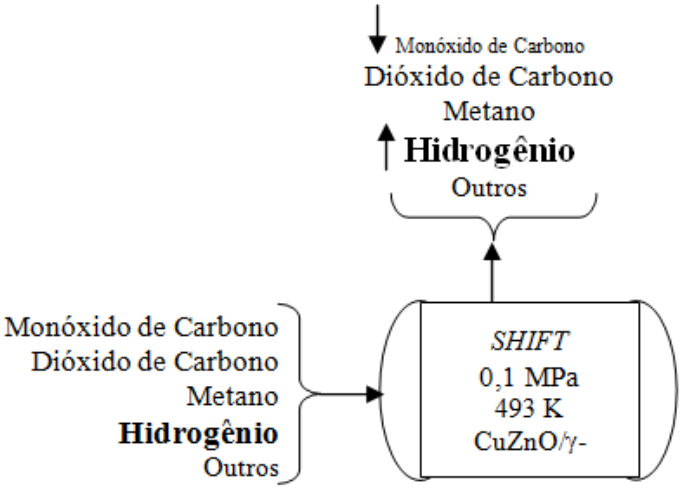


Figura 4 – Reator *Shift*.



Torna-se bastante interessante ressaltar que a produção de gás de síntese, neste caso pesquisada como fins energéticos, encontra-se inserida em um contexto maior. Trata-se do conceito das biorrefinarias, onde pelo uso de gás de síntese, obtido principalmente de biomassa, através do processo de Ficher-Tropsch ocorre a síntese de hidrocarbonetos. Num primeiro momento pode até vir à idéia de que existe uma solução para o futuro energético. Contudo, através de uma análise preliminar chega-se a conclusão de que não há saída para a questão energética nesse contexto, considerando-se a quantidade de biomassa necessária para a síntese com objetivo de substituição dos combustíveis de origem fóssil. Entretanto, a grande revolução trata da possibilidade de continuar produzindo alguns compostos químicos essenciais para a industria moderna e ainda a possibilidade de síntese de novos produtos que tenham, já na sua base, a característica renovável. A Figura 6 apresenta, em uma ilustração, o conceito das biorrefinarias.

O protótipo de reforma de etanol (II), além de contar com os equipamentos indicados na Figura 5, ainda possui um sistema de purga líquida de solução não reagida e secagem do gás que deve estar isento de líquidos para que seja feita a conexão com o sistema de purificação.

Figura 5 – Esquema de funcionamento integrado.

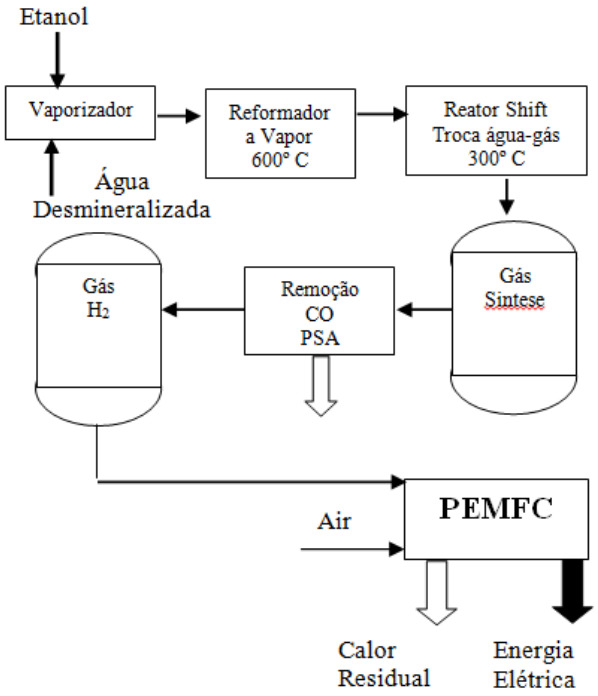
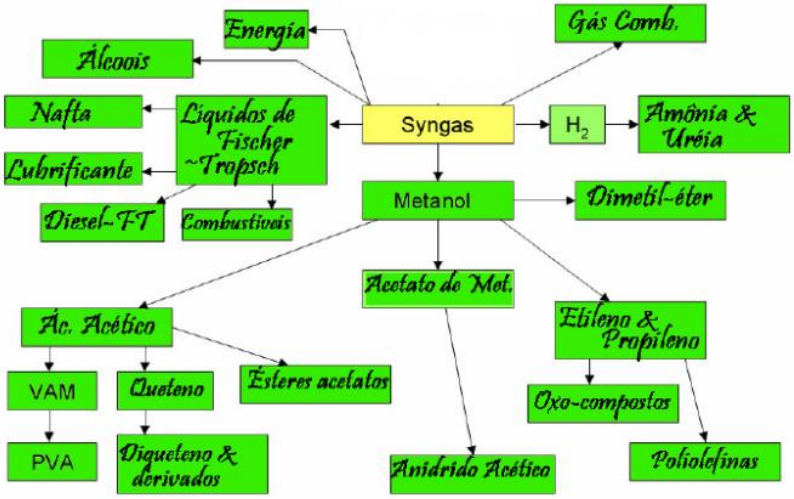


Figura 6 – Biorrefinarias [13].



A Figura 7 mostra o Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio da Cemig. O mesmo encontra-se instalado dentro da área industrial da usina Térmica de Igarapé e é operado pela Gerência de Alternativas Energéticas. Essa instalação tem capacidade de produção de 10 m³ de hidrogênio por eletrólise da água alcalina e, ainda, uma célula a combustível de 1kW de potência. Esses foram resultados dos projetos de P&D Cemig/Aneel de nº 050 e 008 respectivamente. O reformador de etanol – protótipo II vem agregar a instalação em mais uma tecnologia de produção e uso de hidrogênio. A operação conjunta dos equipamentos do laboratório está sendo realizando dentro do projeto de P&D 181.

Figura 7 – Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio.

A Figura 8 mostra o reformador de etanol. A Figura 9 mostra o sistema de purificação PSA (*Pressure Swing Adsortion*) utilizado para a remoção de CO. Essa denominação envolve os ciclos termodinâmicos aos quais as peneiras moleculares encontram-se submetidas a fim de alterar a condição de equilíbrio de adsorção entre a peneira e as moléculas constituintes da mistura, a fim de separar componentes e regenerar o estado de ativação da estrutura de peneira moleculares [9]. Considerando a inconsistência entre as vazões requeridas/disponibilizadas pelos equipamentos acima citados, se fez necessário a adoção de um sistema de compressão e sistema de armazenamento, apresentado na Figura 10. O sistema é composto de um tanque de 1,5 m³ para armazenamento de gás de síntese e 0,5 m³ para armazenamento de hidrogênio 4.0, ou seja, 99,99% [10], resultante da saída da coluna de purificação PSA. Devido uma inconsistência entre as vazões de gás requerido pela coluna de purificação e a vazão disponibilizada pelo sistema de reforma, foi adaptado um sistema de armazenamento e compressão intermediário ao sistema de armazenamento de forma a contornar essa limitação.

Figura 8 – Reformador de etanol – protótipo II.

Figura 9 – Coluna de purificação PSA - Hytron.

(b) Vista frontal

(a) Vista traseira

Figura 10 – Sistema de armazenagem de gás.

Figura 11 – Contentor de gás.

A Figura 12 mostra o sistema de neutralização do gás de purga da coluna de purificação, basicamente monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano. Esse tanque contém uma solução de cal virgem (CaO) que em contato com o dióxido de carbono (CO2) produz carbonato de cálcio (CaCO3). O restante dos gases é descartado para a atmosfera. A Figura 13 mostra a sala do sistema de reforma e integração do mesmo no laboratório de hidrogênio.

Figura 12 – Sistema para neutralização do gás de purga.

Figura 13 – Sistema de Reforma – Operação integrada.

A Figura 14 mostra o cromatógrafo instalado no laboratório de hidrogênio, onde serão preparadas curvas de calibração para análise do gás produzido ao longo do processo de produção de hidrogênio e uso na célula a combustível. A Figura 15

mostra a célula a combustível onde será utilizado o gás hidrogênio produzido no sistema reformador a vapor/coluna de purificação.

Figura 14 – Sistema de cromatografia.

Figura 15 – Célula a combustível.

Operação integrada do sistema ocorre na seguinte sequência:

- Operar reformador e encher o contentor;
- Comprimir o gás do contentor usando o compressor isento de óleo, e seu reservatório;
- Descarregar o gás do compressor no tanque de gás de síntese;
- Usar sistema para acondicionamento adequado do gás (válvulas reguladoras de pressão e direcionais);
- Operar a coluna de purificação produzindo hidrogênio purificado;
- Armazenar o hidrogênio no tanque de gás purificado;
- Descartar o gás de purga da coluna no sistema de neutralização do gás;
- Usando válvula reguladora de pressão, conectar tanque de gás à célula a combustível.

Alguns do problema ocorridos ao longo do projeto são listados abaixo:

- Atrasos na entrega de material por parte dos fornecedores;
- Dificuldade de se encontrar o material especificado para atendimento dos requisitos de projeto;
- Problemas no cromatógrafo do laboratório de hidrogênio. Este item merece um comentário maior. Instalado o equipamento no laboratório, o mesmo não atingiu a sensibilidade necessária para gases utltrapurificados e, além disso, houve frequentes falhas em diversos de seus componentes. A assistência técnica por parte do fabricante (Cromacon Ciola) se mostrou de grande dificuldade e não atendeu à condição de funcionamento exigida pelo processo. Diante disso, espera-se fazer análises apenas no limite de sensibilidade do equipamento. É importante ressaltar que esse equipamento é uma peça chave no processo, uma vez que ele será responsável pela qualificação do gás produzido.
- Demora na entrega dos vasos de pressão;
- Necessidade de realização adequações e prontuários de NR 13 nos vasos adquiridos;
- Necessidades de adaptações na sala onde o sistema seria instalado (sistema elétrico, sistema de ventilação);
- Adaptação do processo para interligação;
- Opção por rota tecnológica de maior gasto energético;
- Isolamento térmico de maior peso;
- Desmontagens do sistema para retirada de pontos de aterramento da carcaça;

- Peças frágeis do sistema, como por exemplo, a bomba peristáltica, que exigiu reparos; ou o sistema de purga líquida, que apresentou alta corrosão após algumas operações, necessitando ser substituído.

Cabe ressaltar que todas as dificuldades devem ser tratadas no âmbito dos projetos de P&D e sendo assim, pode-se encará-lo como uma oportunidade de aprendizado e de possibilidades de atuação em projetos futuros.

A operação nos laboratórios da UNESP resultou na produção de um gás com a seguinte composição, conforme laudo de análises cromatográficas [11], apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da Análise do gás de síntese com *Shift* – Protótipo II – Unesp.

Amostra	H_2	CO	CH_4	CO_2	O_2	N_2
1	48,7	4,0	15,4	17,0	0,2	1,0
2	48,4	3,3	11,8	13,3	1,9	6,9
3	50,4	3,2	12,0	13,9	1,7	6,0
4	52,9	3,0	11,4	13,7	1,3	4,7

Incerteza analítica ± 0,7%mol/mol

No dia 20/06/2008, aconteceu à operação integrada do sistema, conforme descrito a seguir. Houve desmontagem/montagem previamente e feita avaliação das condições dos catalisadores em novembro/2007, conforme [12]. Foi detectado que durante a operação do sistema no laboratório de hidrogênio houve sinterização de parte do catalisador dos reatores, o que pode comprometer na produção de hidrogênio. O sistema foi montado e posto em condição de funcionamento. Antes da operação de produção foi realizada a ativação do catalisador por secagem do sistema, pela passagem de gás inerte (nitrogênio) e passagem de gás hidrogênio, durante período de aproximadamente 1 hora, estando o processo com o sistema em condição apropriada de aquecimento. Após a ativação, uma solução de 500 ml de água e 475 ml de etanol, que representa uma relação de massa água/etanol igual a 0,95, o que equivale a uma relação de 3 moles de água por mol de etanol, foi preparada e alimentada no sistema por meio do bombeamento peristáltico. Foi variada a condição operacional da vazão até atingir a vazão máxima de saída. A Tabela 2 foi obtida através de análises cromatográficas de amostras coletadas. As análises cromatográficas e de espectrofotometria de infravermelho foram realizadas na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Para os resultados cromatográficos foi utilizado como método de ensaio a norma ASTM 1975/96 [14]. Para os resultados de espectrofotometria de infravermelho utilizou-se à biblioteca espectral NIST 2005 [15].

Tabela 2 – Resultados da Análise do gás de síntese com *Shift* – Protótipo II - Cemig.

Amostra	H_2	CO	CH_4	CO_2	O_2	N_2
Síntese	75,24	8,64	6,79	8,12	< 1	< 1
Hidrog.	99,84	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

Um resumo da análise de espectrofotometria de infravermelho nas amostras gasosas e em uma amostra da purga líquida do sistema é apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 – Resultados da Análise de espectrofotometria – Protótipo II.

TR	Composto Identificado	1	2	3
2,350	1-metoxy-2propanol	-	-	X
2,464	2-isopropoxy; methyl, ester, propanoic acid	-	-	X
2,670	1-metoxy, acetato, ethanol	-	-	X
3,261	1-ciclopropil, 2-propanone	-	-	X
4,222	benzene	X	-	X
4,792	1-ethylmethyl, hydropeoxide	-	-	X
6,952	toluene	X	-	X
9,585	p-xilene	X	-	X
10,124	o-xilene	X	-	X
11,901	vinylfuran	-	-	X
12,168	2-clorophenol	-	-	X
12,798	2–ethyl-4methyl, pentanol	-	-	X
13,037	indane	X	-	X
13,223	1-propynyl-benzene	X	-	X
14,314	2-methyl-benzofuran	X	-	X
15,219	1-2-3-4-tetrahydronaphtalene	-	-	X
15,643	naphtalene	X	-	X
17,264	1-methil-naphtaleno	-	-	X
	2-methil-naphtaleno	-	-	X
17,495	2-methil-naphtaleno	-	-	X
18,377	Biphenyl	-	-	X
20,214	Dibenzofuran	-	-	X
21,026	Fluoreno	-	-	X

TR é o tempo de retenção, 1 trata-se da amostra de gás de síntese, 2 é a amostra de hidrogênio purificado e 3 é a amostra de purga líquida. Não foi identificado nenhum composto no gás hidrogênio purificado. Alguns dos compostos encontrados acima podem ser resultantes de contaminação do sistema, como por exemplo, pintura do novo sistema de purga, graxa em conexões e outros. Haja vista a impossibilidade de formação desses compostos pela simples operação de etanol com vapor de água.

15.4 Conclusões

A Cemig GT SA obteve com esse projeto um conhecimento aprofundado a respeito de processos de produção de hidrogênio por reforma de etanol, composto pelos

relatórios técnicos e de levantamento bibliográfico. Além disso, pode-se agregar ao laboratório experimental de hidrogênio da Cemig o protótipo de reformador II, oferecendo mais uma rota de produção de hidrogênio. A operação deste sistema de forma integrada e em conjunto com as demais partes da instalação contribuem para a formação de mão de obra e desenvolvimento de tecnologia em reforma de etanol.

A UNESP realizou a formação de recursos humanos na área de reforma de etanol e obtenção de reconhecimento científico pela participação em seminários e divulgação do trabalho em diversos fóruns de discussão científica, sendo 8 artigos em congressos nacionais e internacionais e ainda 4 resumos em eventos nacionais e internacionais. Cabe ressaltar a relevância dos fóruns científicos, como por exemplo, *American Society of Mechanical Engineers* - ASME e o *Journal of Fuel Cell Science and Technology*. A instituição participou ainda da organização de eventos com tema de hidrogênio e células a combustível e teve demanda de serviços de consultoria na área.

O sistema de reforma encontra-se no laboratório montado e operando de forma integrada. Para tal foram necessárias adequações e modificações. É possível a produção de aproximadamente 0,7 m³/h de gás de síntese em condição de máxima alimentação de solução líquida. O gás hidrogênio purificado possui pureza de 99,84 %. Os procedimentos para operação do mesmo foram levantados e elaborados conforme documento baseado no sistema de gestão integrada.

Pode-se considerar que os objetivos propostos para o projeto foram alcançados.

Como sugestão de trabalhos futuros ou continuação deste projeto podem ser citadas:

- Melhoria do balanço energético;
- Melhoria do arranjo do sistema, otimizando os sistemas de isolamento e aquecimento;
- Automatização e instrumentação do sistema;
- Pesquisa e desenvolvimento de novos catalisadores com características multifuncionais, mais eficientes e barato específicos para reforma de etanol;
- Interligação reformador/purificação/célula a combustível de forma direta.

O dispositivo construído contribui para o desenvolvimento de tecnologia de energia limpa e, consequentemente, busca reduzir a dependência do petróleo. Nesse contexto, a reforma a vapor de etanol apresenta um vasto potencial no desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis.

A reforma de etanol permanece como uma opção viável para a geração de energia elétrica e como amplo campo de pesquisas rumo ao amadurecimento da tecnologia.

Capítulo 16

Capítulo 16: Produção de biodiesel para geração de energia elétrica em microturbinas e motores estacionários[16]

***Resumo*- O consumo do biodiesel e de suas misturas com o diesel pode ajudar um país a diminuir sua dependência do petróleo, contribuir para a redução da poluição atmosférica, além de gerar alternativas de empregos em áreas geográficas menos propícias para outras atividades econômicas, promovendo assim, a inclusão social. Este trabalho relata a identificação da disponibilidade de oleaginosas no estado de Minas Gerais e o desenvolvimento associados com a construção do Laboratório Experimental de Biodiesel, resultante da parceria entre a Cemig e o Cetec. O biodiesel produzido na planta piloto foi utilizado em uma microturbina, bem como em um motor estacionário para avaliar o desempenho na geração de energia elétrica e quantificar as emissões de gases poluentes e particulados resultantes no processo de combustão. Os resultados indicam as potencialidades promissoras do uso do biodiesel bem com as principais barreiras e dificuldades em sua utilização e expansão.**

16.1 Introdução

O petróleo e seus derivados tornaram-se mais que uma necessidade à vida, sendo condições básicas para a propriedade e bem-estar das nações civilizadas [1]. Além dos combustíveis fósseis, os derivados do petróleo encontram-se em diversos materiais usados no dia a dia, dos quais não se pode prescindir. Entretanto a partir da constatação de que os recursos naturais são finitos, durante a década de 1970, onde ocorreu a primeira grande crise do petróleo, o mundo busca opções a esse recurso, tanto do lado energético como na forma de insumo químico.

Nesse contexto o biodiesel se apresenta como uma opção de combustível, possuindo como principais características: a origem renovável, ser biodegradável e de uso ecologicamente correto [12]. É produzido a partir da reação química entre um óleo, que pode ser de origem vegetal ou animal, e um álcool, podendo ser ambos: metanol ou etanol.

Trata-se de um combustível, composto basicamente por alquiésteres de ácidos graxos de cadeia longa derivados de óleos. O óleo e o álcool apenas misturados ao diesel não são biodiesel.

Existem diversas formas de se produzir biodiesel: o craqueamento, a esterificação e a transesterificação, sendo esta última a mais comum no Brasil e no mundo. Um subproduto da produção do biodiesel é a glicerina, que hoje se caracteriza como um grande problema devido não possuir um mercado capaz de absorver toda a sua

[16] SILVA, C. H. F. da; MARTINS, A. F.; TEIXEIRA, L. C.. Publicado em Biomassa & Energia (Viçosa), v. 4, p. 101112, 2011.

produção. Entretanto para o futuro existem diversas possibilidades como, por exemplo, a geração de gás de síntese, podendo ser feita inclusive a síntese de combustível na forma da reação de Fischer-Tropsch ou a reforma para se produzir hidrogênio [5].

O uso de biodiesel diversifica e flexibiliza a fonte primária de combustíveis, ampliando a fração renovável de energia apresentada pela matriz energética nacional pelo aumento da utilização de biomassa, tendo como grandes benefícios a opção de escolha para o consumidor e a garantia de suprimento. Além disso, pode-se fazer o uso de créditos de carbono e mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) [6].

A produção de oleaginosas para biodiesel representa uma grande oportunidade para os pequenos produtores rurais, podendo contribuir significativamente para a elevação da renda e da qualidade de vida [7]. Como grande barreira pode-se citar o alto custo inicial de um projeto desta natureza.

A oportunidade neste caso não é só para os pequenos produtores, mas isto tem reflexos para o país que obtém mais segurança energética, dominando e integrando cadeias produtivas, com possibilidade de exportar o produto, realizar parcerias internacionais, gerando divisas para o país e reduzindo as desigualdades regionais. É possível perceber também que o desenvolvimento do biodiesel, seja pela regulamentação ou pelo mercado, direciona algumas ações para as indústrias, como por exemplo, o desenvolvimento e teste de motores específicos para operação com biodiesel e da indústria nacional para a fabricação de máquinas e equipamentos para a produção de biodiesel.

O biodiesel leva a exploração das potencialidades regionais e significa uma importante contribuição para a sustentabilidade, geração de renda e preservação ambiental. Um exemplo disso é a pesquisa e exploração oleaginosas típicas da Amazônia, cujos resultados se mostram promissores [8].

A produção de óleo para biodiesel não contribui para a crise dos alimentos. Existe grande possibilidade de expansão na produção de oleaginosas, uma vez que o país dispõe de terras agricultáveis que ainda não são exploradas e trata-se de uma cultura energeticamente eficiente, além disso, cabe ressaltar os possíveis ganhos pela eficientização dos processos produtivos. Acrescenta-se também que na etapa de extração da oleaginosa é gerado o farelo ou torta oleaginosa rica em proteínas para compor ração animal.

A legislação ambiental, em certa medida, atua de forma a regular os limites territoriais para expansão das plantações. Os fatores para a crise de alimentos são de fato a dependência de petróleo e por consequência a dependência da agricultura deste energético, dada pela necessidade de fertilizantes. A grande origem da escassez de alimentos é o aumento da renda e o cenário econômico e social [10].

A utilização de óleo de cozinha usado para a produção de biodiesel também representa um grande potencial, tanto do ponto de vista de disponibilidade de matéria-

prima, quanto de solução de um problema ambiental, considerando que atualmente uma parcela significativa deste óleo é lançada no esgoto doméstico [9].

A Cemig investe em biodiesel através da parceria, com a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), efetivada pelo Projeto de P&D 141, que resultou na construção do laboratório experimental de produção de biodiesel juntamente com ensaios e testes em motores de combustão interna e em microturbina. A Empresa pesquisa e desenvolve o biodiesel principalmente pelos seguintes motivos: explorar possibilidades energéticas; avaliar alternativas e oportunidades para o negócio associado com biocombustíveis; combustível renovável; colaboração com os esforços governamentais, agregando os benefícios associados; possibilidade de utilização do combustível em sua frota e em geração distribuída; atacar o problema de logística para sistemas de geração distribuída; avaliar e reduzir custos do processo; contribuir para o desenvolvimento tecnológico, criando competência, formando mão-de-obra e assegurando o desenvolvimento regional; atuar em aspectos de sustentabilidade e responsabilidade social; identificação e fomento de potencialidades regionais.

A seção 16.2 apresenta um breve histórico do desenvolvimento desta pesquisa. A seção 16.3 apresenta o laboratório de biodiesel da Cetec. Na seção 16.4 encontram-se os resultados e principais discussões decorrentes deste projeto. As conclusões do trabalho encontram-se na seção 16.5 e no capítulo 33 estão as referências bibliográficas utilizadas.

16.2 P&D CEMIG/ANEEL Nº 141

O primeiro a usar óleos vegetais em motores foi Rudolf Diesel e ocorreu em 1900. No Brasil, o uso de biomassa para energia teve o seu ápice com o Programa Pró-Álcool na década de 1970 [4]. Em 2004 o Governo Federal lançou o Programa de Produção e Uso do Biodiesel, constituindo-se no marco regulatório e sobre o qual foram gerados diversos dispositivos legais de forma a se constituir o arcabouço legal. O cronograma para a rampa de crescimento de utilização do biodiesel misturado ao petróleo é mostrado na Figura 1. A Figura 2 apresenta um esquema da cadeia de produtiva de onde é possível desenvolver a produção de biodiesel. Na Figura 3 observam-se as oleaginosas potenciais para a produção de biodiesel no Brasil.

Figura 1 – Utilização de biodiesel em petróleo.

No mundo, as oleaginosas mais exploradas para a produção de biodiesel são: a colza e o girassol. A produção mundial total de biodiesel em 2006 foi de aproximadamente 7,5 bilhões de litros [20].

Em 2008 a produção de biodiesel brasileira foi de aproximadamente 1,16 bilhões de litros [3], e trata-se de um número expressivo cuja previsão indica um mercado firme em 2013.

Figura 2 – Cadeia de produção do biodiesel.

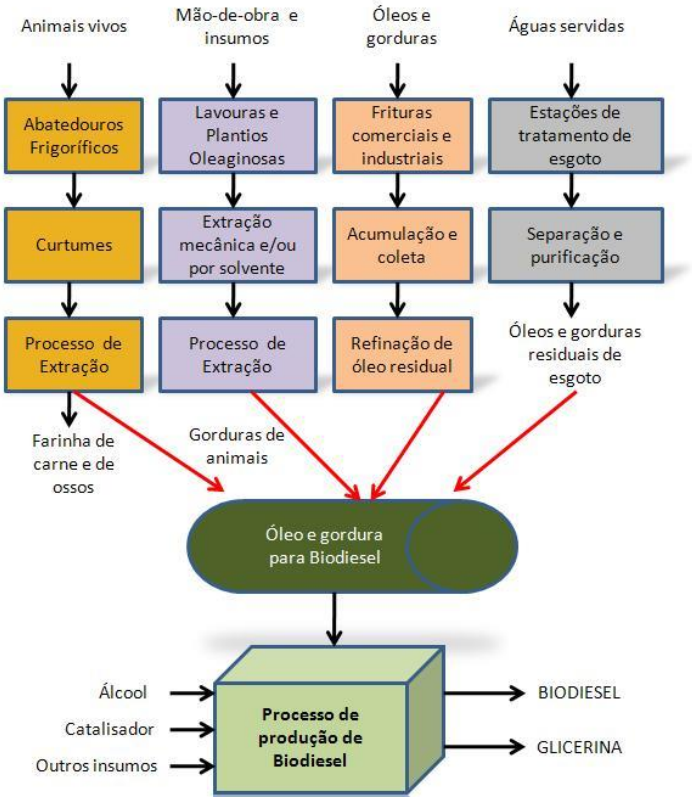


Figura 3 – Potencialidades brasileiras para a produção do biodiesel [13].

O preço do biodiesel para entrega entre outubro/dezembro de 2009 foi de R$ 2.275,36/m³, atingindo 92.000 m³ comercializados [2]. É interessante ressaltar que no caso em que se utiliza óleo com preço definido pelo mercado, como é o caso do óleo de soja, variações nos preços internacionais terão impactos nos custos de produção.

O P&D CEMIG/ANEEL 141 faz parte do ciclo 2003/2004 [18]. Foi iniciado em Dezembro/2004 e teve o seu encerramento em Dezembro/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Geração e Transmissão SA e a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Seus principais objetivos foram:

- Desenvolvimento tecnológico da produção de biodiesel com verificação da disponibilidade das matérias-primas, oleaginosas nativas, no Estado de Minas Gerais; estudo da cinética de reação minimizando as quantidades de álcool utilizadas; desenvolvimento de uma unidade industrial de produção de biodiesel e produção de óleo transesterificado, pela rota etílica, para realização de ensaios em microturbinas e motores estacionários.

- Caracterização físico-química de óleos vegetais e transesterificados por meio da ampliação e atualização da infraestrutura de caracterização físico-química e controle de qualidade de óleos vegetais e seus produtos transesterificados no CETEC; consolidação do CETEC, através da capacitação do Setor de Análises Químicas, como centro de referência na caracterização físico-química de óleos vegetal e biodiesel;
- Ensaios de eficiência em microturbinas e em motores do ciclo diesel aplicáveis a grupo motogeradores avaliando a eficiência de microturbinas movida a biodiesel na produção de energia elétrica; adequando um motor automotivo comercial para aplicação estacionária, através da alteração de suas curvas características por meio de recalibração do sistema de injeção de combustível; também avaliando os efeitos da utilização de diferentes amostras de biodiesel, assim como diferentes concentrações em misturas destes com o diesel, no desempenho dos motores de combustão interna operando através do ciclo diesel, aplicáveis a grupos motor-gerador; e finalmente quantificando e comparando a opacidade, as emissões de gases poluentes e particulado resultantes da utilização do diesel e das diferentes amostras de biodiesel em motores aplicáveis a geração de energia.

A. Metodologia

Para a obtenção dos resultados deste projeto utilizou-se da seguinte metodologia, descrita de forma resumida a seguir [16]:

- Atualização bibliográfica acerca dos assuntos necessários para o desenvolvimento deste projeto;
- Especificação e aquisição de equipamentos e insumos para laboratório;
- Levantamento de informações de campo sobre oleaginosas nativas e plantadas;
- Instalação dos equipamentos e adequações necessárias;
- Desenvolvimento, implantação e validação de metodologias para testes e ensaios;
- Estudo cinético de produção de biodiesel;
- Análises cromatográficas;
- Análise de qualidade do biodiesel, incluindo o índice de cetano;
- Especificação, projeto, construção e montagem da planta piloto de biodiesel;
- Produção e monitoramento do biodiesel e realização de ensaios e testes de desempenho em microturbinas e motores estacionários;
- Projeto de uma unidade de produção de biodiesel para o campo;
- Demonstração da planta piloto;

- Elaboração de documentação técnica e transferência de conhecimentos entre as equipes da CETEC e da Cemig GT S.A.

B. Benefícios do projeto

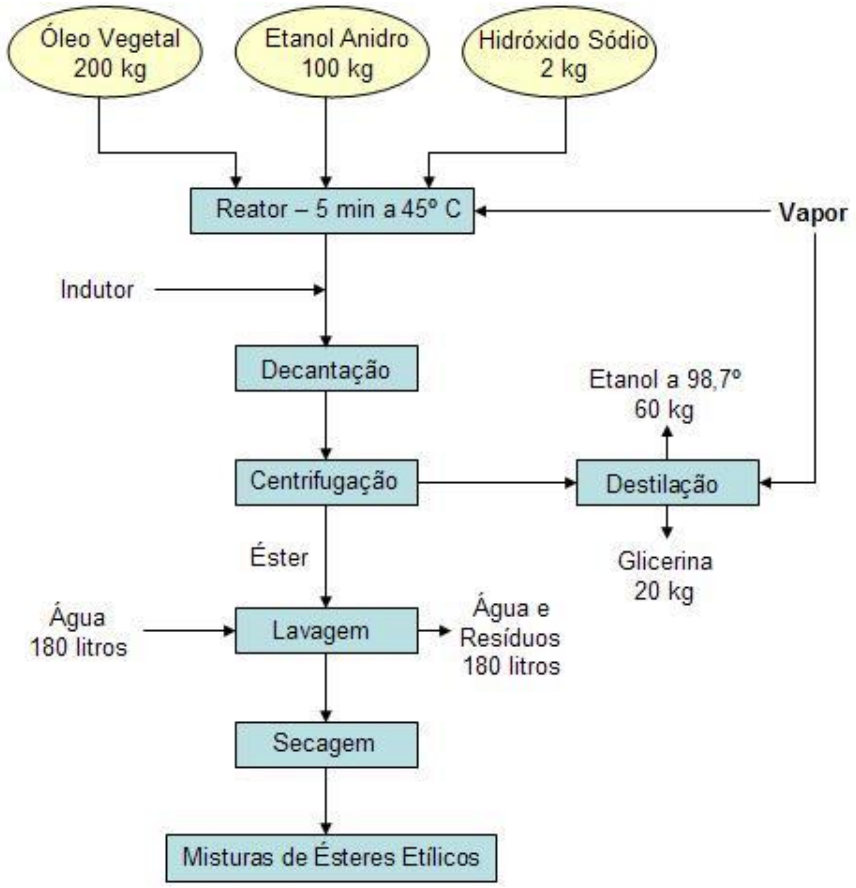
A Cemig participou deste projeto de maneira a formar mão-de-obra para lidar com o assunto, principalmente por se tratar de um processo que é bastante recente para as empresas de energia, uma vez que se encontra mais associado com a indústria de transformação e com a engenharia química dos processos. Os conhecimentos resultantes deste projeto serão aplicados nos segmentos de: atendimento de clientes localizados em regiões remotas; aumento da oferta de energia elétrica; redução de custos; uso alternativo de energia; maior aproveitamento do potencial energético do estado, além da ampliação de escala da planta piloto e na prospecção de oportunidades na área, principalmente considerando-se os conhecimentos obtidos na implantação e validação de procedimentos analíticos para a caracterização físico-química de óleos vegetal e biodiesel [18].

A CETEC obteve a construção e instalação de uma unidade piloto de produção de biodiesel, reforçando a atuação da fundação neste segmento, desenvolvendo tecnologia e se constituindo em um importante centro de referência no assunto de combustível em Minas Gerais. Através deste projeto foi possível reforçar e ampliar o reconhecimento com uma entidade de referência em biodiesel no Estado de Minas Gerais.

16.3 Produção de Biodiesel

A Figura 4 apresenta um esquema do balanço de massa do processo de transesterificação para a produção de biodiesel.

Figura 4 – Balanço de massa da produção de biodiesel.



A. A reação de transesterificação

O biodiesel é comumente produzido por meio de uma reação química denominada transesterificação. No caso específico para a reação abaixo, os triacilgliceróis, de origem animal/vegetal, reagem com o metanol, na presença de um catalisador, produzindo glicerol (subproduto) e o éster metílico de ácido graxo (biodiesel). A reação de transesterificação pode ser catalisada por ácido ou base. A Figura 5 mostra a reação química do processo. A estequiometria da reação de transesterificação requer 3 moles de álcool para cada mol de triglicerídeos (TG), gerando 1 mol de glicerol (GL) e 3 moles de ésteres de acordo com o esquema apresentado na Figura 6.

Figura 5 – Reação de transesterificação para produção de biodiesel.

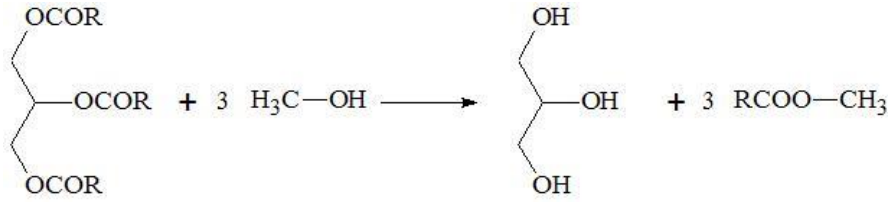
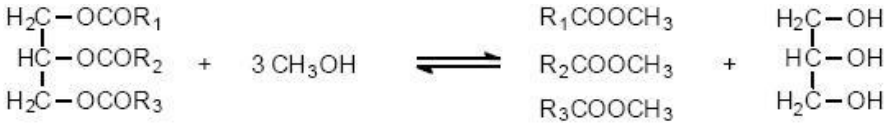


Figura 6 – Estequiometria da reação de transesterificação para produção de biodiesel.



B. Análises

Os seguintes equipamentos foram adquiridos para se realizar as análises do biodiesel produzido na planta piloto:

- Microresíduo de carbono (Alcor);
- Aparelho para determinação de ponto de entupimento (Herzog);
- Banho Criostático (Tamson);
- Aparelho automático para determinação do ponto de fulgor (Herzog);
- Destilador a vácuo (BR Instruments);
- Densímetro digital (Anton Paar);
- Titulador potenciométrico (Metrohm);
- Colunas Cromatográficas (J&W).

Foram analisados os seguintes parâmetros: massa específica, aspecto, ponto de fulgor, teor de (cálcio, fósforo, potássio, sódio, magnésio), acidez total, viscosidade, teor de éster total, teor de umidade (% m/m), corrosividade ao cobre, teor de monoglicerídeos, diglicerídeos, triglicerídeos, glicerol livre, glicerol total. As análises foram realizadas e os resultados demonstram a adequação do biodiesel produzido aos requisitos técnicos.

C. Análise Cromatográfica

A pureza do biodiesel, ou seja, a concentração de ésteres no biodiesel é calculada, principalmente, através da cromatografia gasosa de alta resolução.

As análises dos ésteres foram realizadas pelo setor de análises químicas da Cetec (STQ) sob a coordenação da Dra Olguita G. F. Rocha , utilizando o cromatógrafo Perkin-Elmer, modelo auto system XL, dotado de coluna capilar Carbowax

(PECW) 50 m x 0,32 mm x 0,25 μm, usando H2 como gás de arraste: 1 mL/min; modo de injeção split 1/70, temperatura do , temperatura do detector (FID) 250 ºC.

Temperatura do forno: 200 ºC, durante 8 minutos. Padrão interno: heptanoato de etila, na concentração de 10 mg/mL em amostra de biodiesel.

Os resultados de alguns ensaios por cromatografia indicaram um teor de éster total (biodiesel) variando entre 96-99,4 % com glicerol total na faixa de 0,33-0,62 %.

D. Emissões

Um dos focos desta pesquisa é o estudo da utilização do biodiesel em motores de combustão interna em substituição ao óleo diesel aplicado principalmente ao conjunto motor-gerador de eletricidade. Estes estudos incluem um levantamento do desempenho dos motores diesel utilizando o biodiesel, em comparação ao uso do óleo diesel nos mesmos, como também das emissões de gases poluentes utilizando este biocombustível.

Foram realizados testes para se avaliar quantitativamente um motor ciclo diesel operando em regime de plena carga utilizando biodiesel puro de soja (B100) quando se varia a temperatura de entrada deste combustível e comparar os resultados obtidos com os resultados obtidos para este mesmo motor utilizando óleo diesel com temperatura de 40º C na entrada. Os parâmetros estudados foram: torque potência, consumo específico de combustível e emissões de gases de escapamento (CO, CO2, NOx, HC, COc).

Todos os ensaios realizados serviram como ferramenta de análise para a avaliação comparativa da eficiência dos combustíveis alternativos e, do ponto de vista ambiental, gerou informações para ações de apoio à minimização do impacto ambiental provocado pelas emissões dos motores do ciclo diesel, sendo, este, um passo importante para a substituição do diesel. Nas Figuras 7-13 é apresentado um extrato dos resultados de ensaios a plena carga, com B100 e Diesel metropolitano, variando-se a temperatura de entrada do combustível. Em todos os testes o motor estava ajustado com um avanço de 1,17 mm (Teixeira, 2009a). Os resultados de testes para a microturbina não serão apresentados aqui, mas de maneira geral eles estão alinhados e corroboram com os resultados obtidos para a operação do motor.

Figura 7 – Curva de potência.

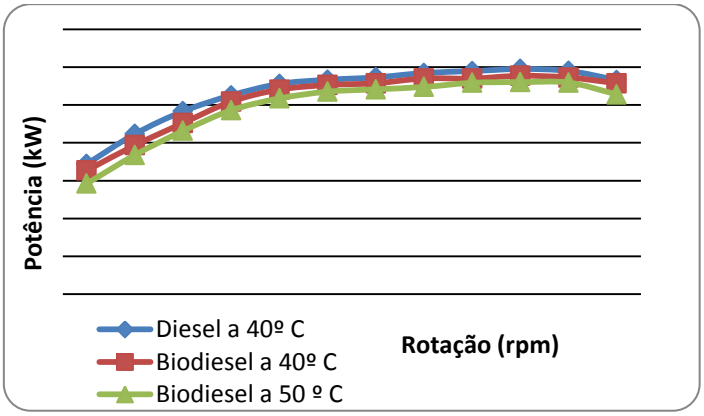


Figura 8 – Curva de torque.

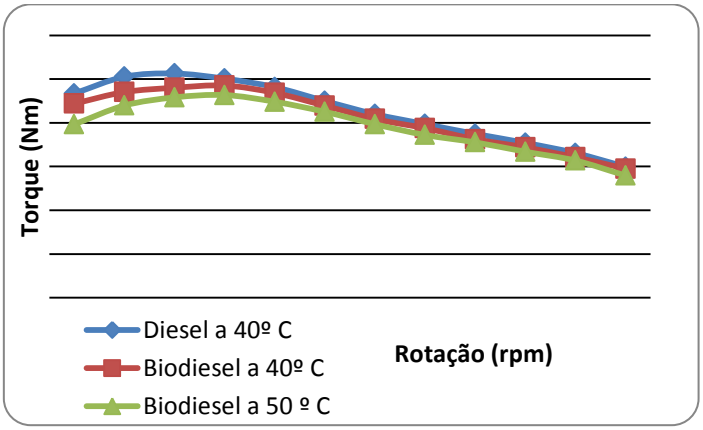


Figura 9 – Curva de consumo específico.

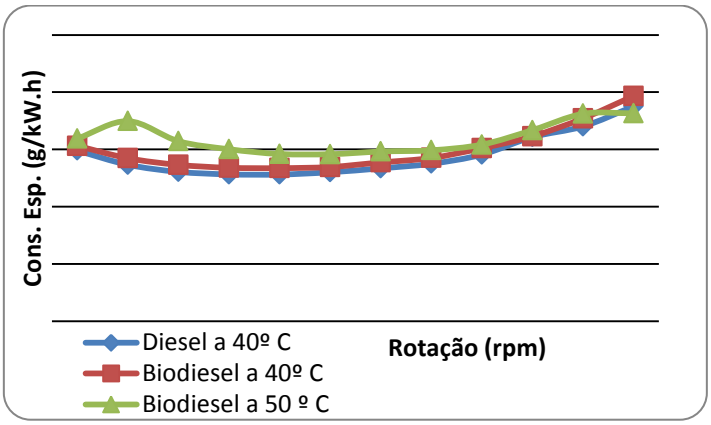


Figura 10 – Curva de emissão de CO.

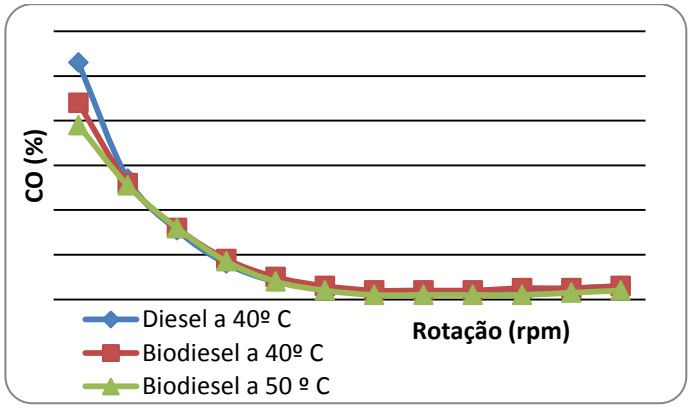


Figura 11 – Curva de emissão de CO2.

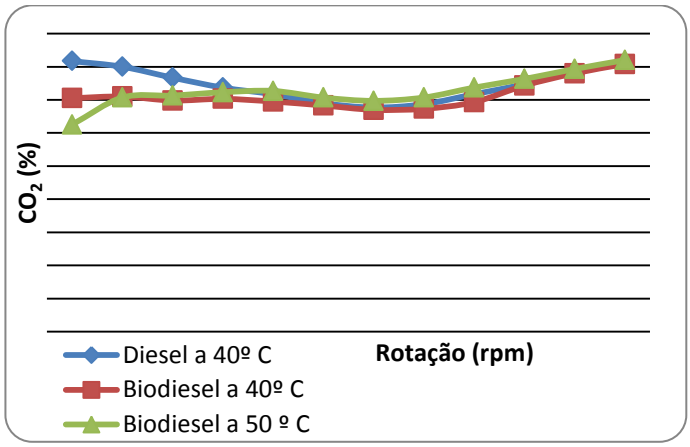


Figura 12 – Curva de emissão de hidrocarbonetos.

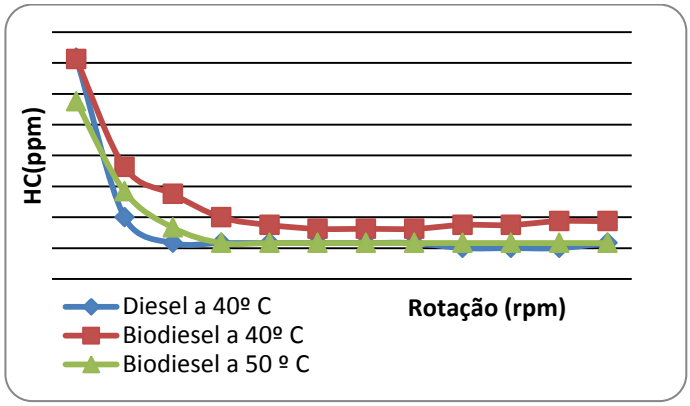
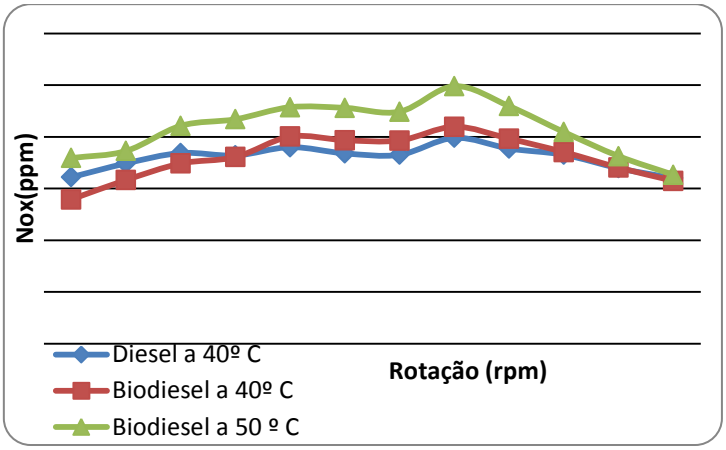


Figura 13 – Curva de emissão de NOx.



As curvas de desempenho mostram que o aumento da temperatura do biodiesel não acarreta em ganhos para o motor. Outra constatação que pode ser obtida é de que os resultados para o biodiesel se aproximam bastante do comportamento do diesel.

16.4 Laboratório de Produção de Biodiesel: Resultados

No âmbito nacional são diversas as culturas que potencialmente podem ser utilizadas para a produção de biodiesel, conforme indica a Tabela I. Entretanto é inquestionável a supremacia da soja frente às outras oleaginosas.

Tabela I – Potencialidades das oleaginosas brasileiras [12].

Matéria-prima	***Teor Óleo (%)***	***Produtiv. Kg/ha***	***Biodiesel l/ha***
Algodão	19	1.900	427
Amendoim	45	1750	931
Canola	36	1675	643
Girassol	44	1800	937
Mamona	47	1000	556
Nabo forrag.	30	800	284
Soja	20	2800	662

Outras culturas têm sido estudadas recentemente e se mostram bastante promissoras, como por exemplo, o pinhão-manso (teor de óleo em torno de 37% e produtividade de 1100-1300 l de biodiesel por hectare) e o dendê (teor de óleo de 20% e produtividade de 3.700 l de biodiesel por hectare). Este último tem sido explorado comercialmente, no estado do Pará, por meio de plantios agrícolas organizados e obtidos a partir de material híbrido. Como novo potencial deve ser realçado as

pesquisas com a macaúba em Minas Gerais que poderá superar a produtividade do dendê em alguns anos [15].

Nesse caso a opção da pesquisa com óleo de soja se deu simplesmente por ser uma matéria-prima para subsidiar o projeto de construção da planta piloto e validação da produção, e ainda disponível em quantidade e qualidade no mercado de óleos. Na época concluiu-se que, quando a unidade estivesse em operação, seria fácil realizar a sua adaptação para outra oleaginosa que se mostra-se com melhor competitividade

A opção de pesquisa pela rota etílica recai nas vantagens que se pode obter em relação à rota metílica como, por exemplo: a origem renovável e limpa, possibilidade de produção nacional, menor risco diante da menor toxicidade do etanol e oferta estável. Outra opção realizada foi a construção e operação de um processo em batelada, considerando-se para tal a produção de até 10.000 l /ano e a possibilidade de aumento da produção por turnos, adequadas para a condição requerida pela pesquisa. A Figura 14 mostra a instalação onde foi implementada a planta piloto deste projeto, localizado dentro da CETEC em Belo Horizonte.

Figura 14 – Laboratório de Biocombustíveis - CETEC.

Na Figura 15 encontra-se a foto da planta piloto de produção de biodiesel. As Figuras 16-17 mostram o fluxograma do processo mostrando a inserção do biodiesel na cadeia de combustíveis líquidos.

Figura 15 – Processo de produção em batelada de biodiesel.

Figura 16 – Ilustração do processo de produção de biodiesel.

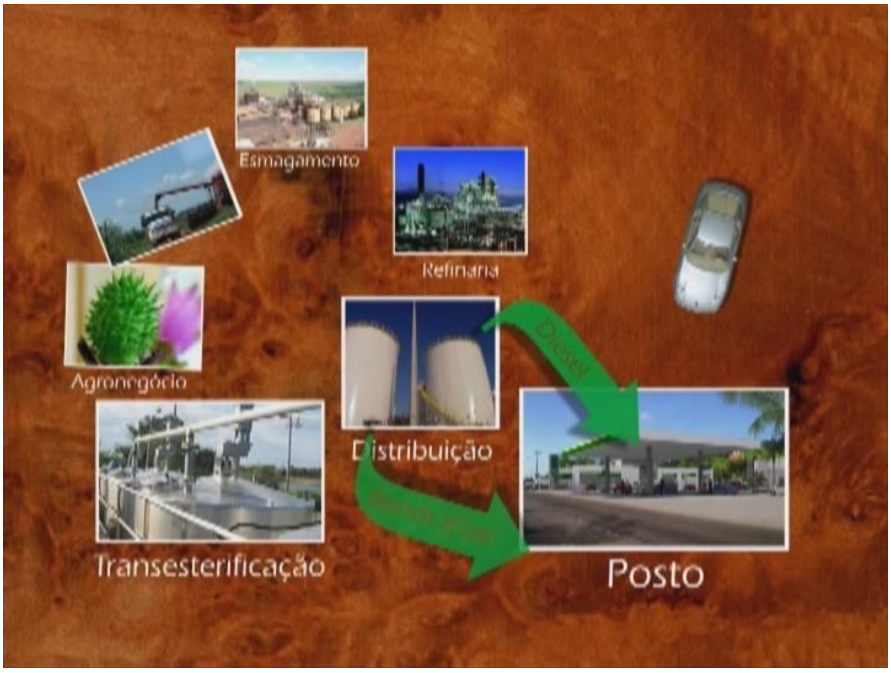
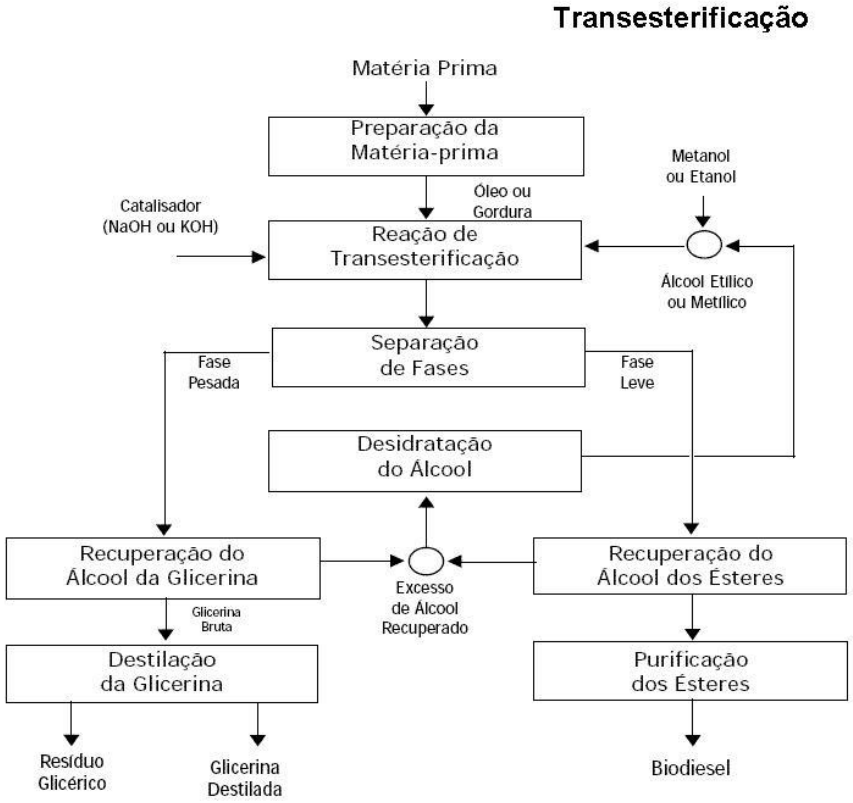


Figura 17 – Fluxograma do processo de produção de biodiesel.



Os resultados de análise de uma produção em batelada, do laboratório de biodiesel do Cetec, indicaram os seguintes resultados [14]:

- Preparação: 180 kg de óleo de soja, 140 l de álcool etílico, 1,8 kg de hidróxido de sódio (PA);
- Resultados: recuperação de 50 l de álcool, umidade de 0,15 %, viscosidade de 6,55 cSt, 175 l de biodiesel, após a secagem com teor de éster de 96,3 % e com redução de mono e diglicerídio e traços de óleo vegetal original (0,0007%);
- Massa específica: 876,9 kg. m^{-3} (NBR 14065-06);
- Acidez total: 0,16 mg/g (procedimento Cetec);
- Viscosidade cinemática a 40ºC: 4,53 mm²/s (NBR 10441-07);
- Corrosividade ao cobre: 1a (NBR 14359-06).

A Figura 18 mostra a microturbina a gás (Capstone, 30 kW) em testes no laboratório de motores da Cetec. A Figura 19 apresenta o veículo Ford Ranger de proprie-

dade da Cemig que foi disponibilizada para a pesquisa, sendo abastecido com 100 % de biodiesel para avaliação de desempenho, emissões e impactos. Na oportunidade o veículo foi adesivado de forma a divulgar o projeto para a sociedade.

O biodiesel não possui enxofre em sua composição e, além disso, reduz em 78 % as emissões líquidas de monóxido de carbono, 9,8 % de anidrido carbônico e em 14,4 % de hidrocarbonetos não queimados [17].

Figura 18 – Microturbina em ensaio no laboratório de motores.

Os resultados para o teste de bancada com o motor a óleo diesel Metropolitano usando B100 em plena carga, com avanço de 1,17 mm. Os resultados para o ensaio de potência resultou em uma perda média de 4 % (limites: 3,01 % - 5,85 %) de potência com em relação ao diesel, nas rotações variando de 1400 - 3600 rpm em degraus de 200 rpm. Os resultados para o torque indicaram uma redução na faixa de 5,36 - 9,61 %. Tais reduções estão associadas às diferenças no poder calorífico dos combustíveis. O consumo específico do combustível também se mostrou em torno de 4 % maior no caso do biodiesel em relação ao diesel. O compor-

tamento de emissões do diesel com o biodiesel mostrou comportamentos semelhantes.

Figura 19 – Veículo da frota da Cemig movido a combustível 100% biodiesel.

16.5 Conclusões

A CEMIG GT SA pôde com este projeto: avaliar oportunidades de negócios; subsidiar ações estratégicas; capacitar técnicos para trabalhos associados ao biodiesel e viabilizar pesquisas em geração distribuída.

O laboratório de produção de biodiesel foi construído montado, equipado e operado experimental dentro do P&D 141. Os objetivos do projeto na proposta deste P&D foram plenamente atingidos.

Foram mapeadas as potencialidades de diversas oleaginosas e sua inserção regional que possuem, contudo, grandes dificuldades em enfrentar a soja, que apresenta uma supremacia razoável sobre as demais oleaginosas.

Houve a produção, caracterização e qualificação de biodiesel. Além disso, houve também a operação de um motor de combustão interna e de microturbina para análise de emissões. Os resultados para emissão do biodiesel mostraram-se bastante próximo ao diesel, indicando que a substituição neste caso não acarretará em perda de eficiência dos equipamentos que fazem uso do biodiesel.

Parte do biodiesel foi usada em veículo da frota da Cemig de forma a testar o desempenho e as emissões em uma situação de uso real. Para o futuro, uma opção para a produção de biodiesel é a utilização de óleo de cozinha usado, de forma a potencializar os benefícios ambientais.

Foi realizado também um projeto de ampliação de escala com proposta de ser uma unidade de pequeno porte com capacidade de produção de 6 mil litros dia, resultando em um custo de investimento da ordem de R$1,2 milhões, operando em processo continuo. Esta escala tem sido sugerida como a escala mínima para se obter viabilidade comercial, com ou sem esmagamento de grãos como atividade paralela.

Na geração de energia elétrica, pelas concessionárias, os custos da geração de energia com biodiesel são bastante superiores às alternativas disponíveis de geração (hidrelétricas e térmicas a gás e a biomassa). No caso de auto produtor ou produtor independente, a geração de energia elétrica com biodiesel, obtido a partir das oleaginosas girassol e soja, pode ser uma solução adequada, quando comparado com algumas tarifas de fornecimento da concessionária, especialmente em horário de pico.

O biodiesel trata-se de uma importante opção energética. O país possui condições privilegiadas para a exploração da energia da biomassa no sentido de contribuir para a questão de segurança energética.

Capítulo 17

Capítulo 17: Sistema de Injeção Eletrônica de Hidrogênio para um Motor Diesel Estacionário[17]

***Resumo*- Este trabalho apresenta um sistema de injeção eletrônica desenvolvido para injeção de hidrogênio em um grupo motor-gerador diesel. O sistema completo é constituído de um sistema de injeção de combustível gasoso comercial e uma unidade de controle eletrônico desenvolvida neste trabalho. Os principais componentes do sistema de injeção eletrônica são descritos em detalhes. O sistema de injeção eletrônica foi instalado e testado em um grupo gerador diesel comercial de 44 kW de potência nominal. Os testes ocorreram com o hidrogênio injetado no coletor de admissão e o óleo diesel, injetado diretamente na câmara de combustão. A vazão mássica de hidrogênio produzida pelo sistema de injeção eletrônica é comparada com valores calculados, baseado na frequência de abertura dos injetores. Os resultados mostram os tempos de abertura dos injetores para se obter vazões mássicas de hidrogênio equivalentes a 5%, 10%, 15% e 20% da energia contida na massa de óleo diesel substituída.**

17.1 Introdução

A economia do hidrogênio trata-se da produção e uso do hidrogênio como vetor energético. Existem muitos gargalos a serem tratados, em diversas linhas de produção e aplicação deste insumo. Dentre eles, aquele associado com a infraestrutura apresenta-se como crítico.

Neste sentido este projeto surgiu como uma oportunidade de se criar uma aplicação imediata para utilização de hidrogênio em motores estacionários. Sobre esta aplicação, seriam minimizados os impactos da deficiência de infraestrutura das tecnologias do hidrogênio energético e ao mesmo tempo, se exploraria a opção de atendimento a comunidades isoladas se utilizando do hidrogênio, que poderia ser produzido no local, por processos de reforma como exemplo. Os resultados obtidos para motores estacionários seriam aplicáveis, ou contribuiriam para aplicações veiculares.

O projeto é uma oportunidade de atendimento às necessidades do setor elétrico e possibilitará o uso do hidrogênio como combustível para grupos motor-gerador, representando, uma alternativa para resolver os maiores problemas relacionados ao uso de combustíveis tradicionais: a limitada disponibilidade de combustíveis fósseis e as emissões de poluentes. O objetivo deste projeto foi desenvolver um sistema de alimentação de hidrogênio para motores de combustão interna para aplicação estacionária (grupo motor-gerador).

[17] SODRÉ, J. R.; SILVA, C. H. F.;. Publicado em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

O principal resultado obtido foi um sistema de alimentação de hidrogênio para motores de combustão interna para aplicação estacionária, incluindo componentes eletromecânicos e *software*. Espera-se que os resultados deste projeto contribuam para a redução dos custos associados ao emprego futuro da tecnologia do hidrogênio, à possibilidade de uso de motores estacionários operando com hidrogênio para aplicação em geração distribuída e à redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) na exaustão de motores utilizados em grupos geradores de energia elétrica.

A conversão do motor de combustão interna para operação com hidrogênio envolveu a adição de injetores adequados a este combustível no sistema de admissão de ar. O novo sistema de alimentação de hidrogênio tem como principais componentes uma central eletrônica e injetores específicos para combustível gasoso. A alimentação do motor diesel do grupo gerador de energia elétrica com injeção indireta de hidrogênio na admissão utiliza a injeção óleo diesel como combustível piloto diretamente na câmara de combustão. O controle da injeção de hidrogênio no motor diesel do grupo gerador foi otimizado para a menor quantidade de combustível injetada, para gerar uma dada potência de carga elétrica demandada.

Os testes experimentais ocorreram em um grupo gerador disponível no Laboratório de Motores da PUC Minas. Antes de iniciar os testes, o gerador foi operado por, pelo menos, 5 minutos após a estabilização das temperaturas de operação recomendadas para o fluido de arrefecimento e para o óleo lubrificante do motor. A temperatura do ar admitido foi mantida entre 20 °C e 30 °C, e a pressão na exaustão foi mantida em 1,08 ± 0,03 bar. Os testes de performance e emissões de CO_2 foram executados em regime permanente com o motor operando na velocidade de rotação de 1800 rev/min, variando a carga aplicada. Foram empregados percentuais da carga de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % e 100 % do valor máximo, além de alguns pontos intermediários. A velocidade estabelecida teve tolerância de ± 50 rev/min, e o percentual da carga de ± 2%. O tempo de estabilização do motor em cada modo foi de 2 min a 10 min, e o tempo de amostragem dos gases de emissões foi de, pelo menos, 30 s ao final de cada modo de operação.

O projeto CEMIG GT-292 (Código Aneel: PD-4591-0292/2008) – Desenvolvimento de um Sistema de Alimentação de Hidrogênio para Motor de Combustão Interna para Aplicação Estacionária – foi concluído em dezembro de 2012. O projeto foi executado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, com o suporte financeiro da CEMIG Geração e Transmissão.

17.2 Desenvolvimento da Pesquisa: P&D GT 292

A. Metodologia

A metodologia essencial sobre a qual o projeto foi desenvolvido foi a pesquisa experimental, cujas principais etapas são citadas a seguir:

- Planejamento da pesquisa;

- Revisão bibliográfica;
- Preparação dos experimentos no grupo gerador;
- Simulação numérica do motor;
- Montagem das salas para o dinamômetro de bancada;
- Análise de resultados do Ano 1 e transferência anual de resultados para a Concessionária;
- Experimentos no grupo gerador;
- Validação do modelo numérico do grupo gerador;
- Preparação dos experimentos no dinamômetro de bancada;
- Análise de resultados do Ano 2 e transferência anual de resultados para a Concessionária;
- Experimentos no dinamômetro de bancada;
- Experimentos no grupo gerador;
- Análise de resultados do Ano 3 e transferência final de resultados para a Concessionária;

B. Resultados Obtidos

A realização deste projeto gerou os seguintes produtos:

- Protótipo: sistema de alimentação de hidrogênio para grupos geradores diesel;
- Métodos e Processos: controle eletrônico para mistura hidrogênio/ar em motores diesel;
- Dissertações de Mestrado:

(1) Marco Aurélio Mendes Justino, "Desempenho de um Grupo Motor-Gerador Alimentado com Óleo Diesel, Gás Natural e Hidrogênio", PUC Minas, março de 2012.

(2) Mario David Mateus Herrera, "Gás Natural e Hidrogênio: Avaliação para Cogeração de Eletricidade e Frio", julho de 2012.

(3) André Marcelino de Morais, "Avaliação do Desempenho de um Motor Diesel Operando com Óleo Diesel e Hidrogênio", PUC Minas, agosto de 2012.

(4) Vinícius Tadeu dos Passos Almeida, "Simulação Numérica de Emissões e Desempenho de um Motor Diesel Operando com Óleo Diesel e Hidrogênio", dezembro de 2012.

(5) Luiz Augusto de Noronha Mendes, "Desempenho e Emissões de CO2 de um Motor Diesel Operando com Óleo Diesel e Hidrogênio Produzido por Hidrólise", dezembro de 2012.

- Artigos publicados em eventos internacionais:

(1) Mendes, Luiz Augusto de Noronha, Almeida, Vinícius Tadeu dos Passos, Morais, André Marcelino, Justino, Marco Aurélio Mendes, Sodré, J. R. Simulação Numérica de um Motor Diesel Operando com Hidrogênio In: 4. SAE BRASIL 2011 – XVIII Conferência e Exibição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, 2011, São Paulo. SAE Technical Paper Series 2011-36-0053. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2011. v.1. p.1-5.

(2) Sodré, José Ricardo, Justino, Marco Aurélio Mendes, Morais, André Marcelino, Oliveira, Alex de, Valente, Osmano Souza. Fuel Consumption of a Diesel Engine Fuelled with Hydrogen, Natural Gas and Diesel Oil Blends In: SAE BRASIL 2012 - XIX Conferência e Exibição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, 2012, São Paulo, SP. SAE Technical Paper Series 2012-36-0107. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2012. v.1. p.1 – 6.

(3) Justino, Marco Aurélio Mendes, Valente, Osmano Souza, Santos, Eduardo Chaves Moreira dos, Silva, Márcio José da, Sodré, José Ricardo. Data Acquisition System for a Diesel Power Generator In: ENCIT 2012 – 14th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering, 2012, Rio de Janeiro, RJ. Proceed-ings of the 14th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering. Rio de Janeiro: ABCM, 2012. v.1. p.1 – 6.

- Palestras em eventos internacionais:

(1) Almeida, Vinícius Tadeu dos Passos, Mendes, Luiz Augusto de Noronha, Sodré, José Ricardo. Evaluation of Exhaust Emissions from a Hydrogen-Fuelled Diesel Power Generator. ACS Spring National Meet-ing & Exposition. San Diego, CA, USA, 2012.

(2) Herrera, Mario David Mateus, Arrieta, F. R. P., Sodré, José Ricardo. CO2 Emission and Thermoeconomic Analysis of a Hydrogen-Fuelled Diesel Power Generator, ACS Spring National Meeting & Exposition 2012. San Diego, CA, USA, 2012.

(3) Almeida, Vinícius Tadeu dos Passos, Mendes, Luiz Augusto de Noronha, Sodré, José Ricardo. Evaluation of Exhaust Emissions from a Hydrogen-Fuelled Diesel Power Generator, AVL Virtual Powertrain Conference , São Paulo, Brazil, 2012.

(4) Morais, André Marcelino, Justino, Marco Aurélio Mendes, Valente, Osmano Souza, Sodré, J. R. Fuel Conversion Efficiency of a Diesel Power Generator Fuelled by Hydrogen, XX International Materials Re-search Congress. Cancun, México, 2011.

(5) Almeida, Vinícius Tadeu dos Passos, Mendes, Luiz Augusto de Noronha, Morais, André Marcelino, Justino, Marco Aurélio Mendes, Sodré, J. R. Numerical Simulation of Diesel Engines Operating with Hydro-gen as Fuel, XX International Materials Research Congress. Cancun, México, 2011.

(6) Herrera, Mario David Mateus, Arrieta, F. R. P., Sodré, J. R. Thermoeconomic Analysis of the Exhaust Gas of a Hydrogen-Fuelled Diesel Power Generator as Energy Source for an Absorption Refrigeration System, XX International Materials Research Congress. Cancun, México, 2011.

17.3 Central Eletrônica de Injeção de Hidrogênio

Um sistema de injeção multiponto de combustível gasoso comercial foi empregado para a injeção uniforme de hidrogênio nos quatro cilindros do motor (Figura 1). O sistema de injeção adaptado no coletor de admissão do motor é desenvolvido pela Magneti Marelli para os motores denominados de tetra *fuel*, que utilizam a gasolina nacional, gasolina adotada em outros países (desprovida de etanol), etanol e gás natural. O sistema de injeção contém um ramo de distribuição (a) e quatro válvulas de injeção (b). A Figura 2 mostra o sistema de injeção instalado no coletor de admissão. Quando o motor opera no modo padrão, sem a injeção de hidrogênio, a presença do sistema não interfere na operação do motor.

Figura 1 – Injetores de hidrogênio instalados no coletor de ar de admissão.

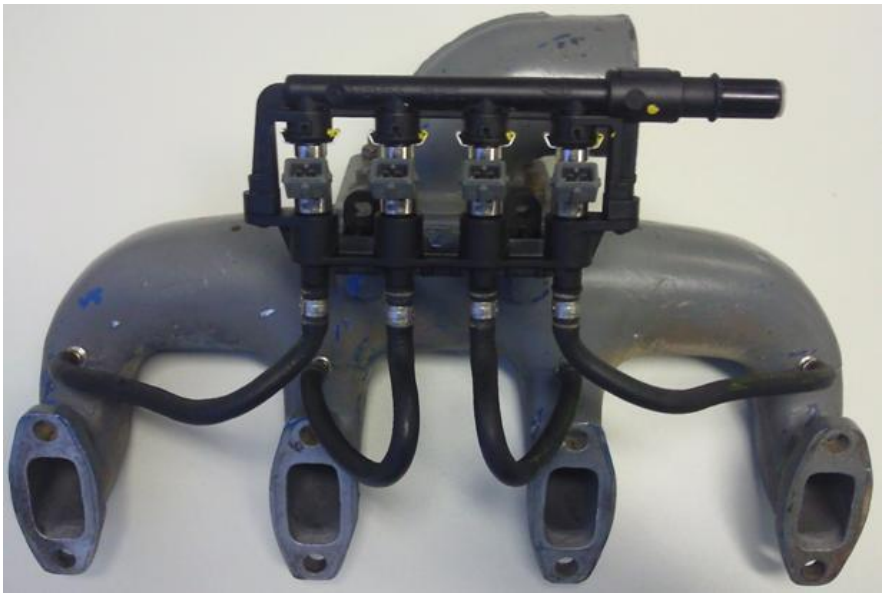
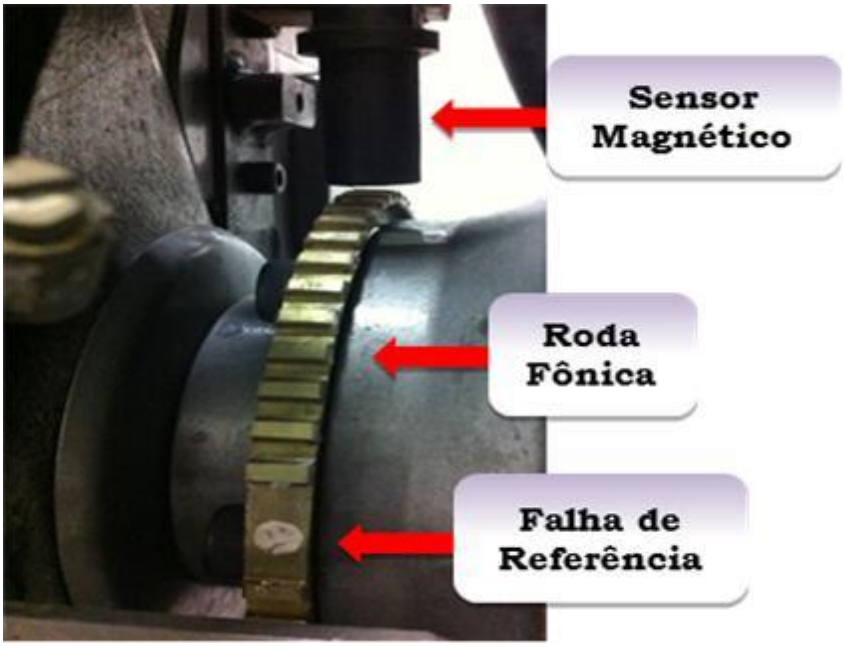


Figura 2 – Injetores de hidrogênio instalados no coletor de ar de admissão.

Para determinação do ângulo de injeção acoplou-se no eixo do volante do motor uma roda dentada, fabricada com material ferroso, que possui 58 dentes e um espaço equivalente a dois dentes. No setor automotivo este componente é chamado de roda fônica. Cada dente da roda equivale a seis graus no ciclo do motor e define o menor ângulo de injeção possível. Fixou-se um sensor magnético próximo a roda fônica. Para a correta captação do sinal do sensor é indispensável que a distância entre o sensor e a extremidade do dente esteja devidamente fixada. Para isso foi construído um suporte móvel, que possibilita o posicionamento correto do sensor. A Figura 3 mostra a roda fônica destacando a falha de dois dentes e o posicionamento do sensor magnético.

Figura 3 – Sensor de rotação e roda fônica.



Para determinar a potência de demanda do grupo gerador, utilizou-se o transdutor UPD-200 (Figura 4). O UPD-200 é um transdutor multivariável de grandezas elétricas, produzido pela empresa Ciber do Brasil. Microprocessado e programável, o transdutor executa medição, cálculo e visualização dos principais parâmetros de redes elétricas trifásicas equilibradas e desequilibradas. As medições são efetuadas em *true rms* – do inglês, verdadeiro valor eficaz. O UPD-200 permite a visualização dos parâmetros elétricos através de um mostrador LCD retro iluminado. Entre outras aplicações, o transdutor é comumente utilizado para medição remota de variáveis elétricas, automação de subestações, análise e controle de demanda, análise e controle de fator de potência, análise de consumo de energia e rateio de consumo de energia industrial e comercial. O UPD-200 dispõe de uma interface de comunicação RS-485 com protocolo MODBUS RTU que possibilita a comunicação com um computador ou com controladores programáveis.

Figura 4 – Transdutor Multivariável - UPD 200.

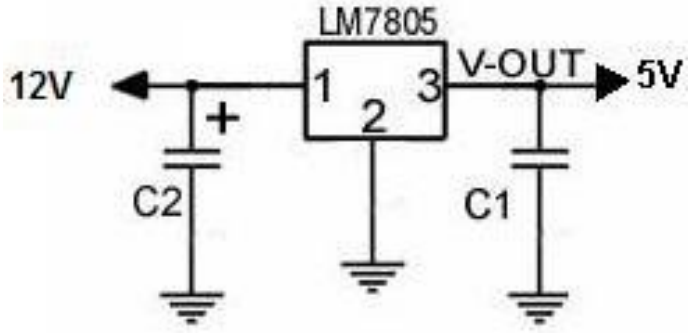
A central eletrônica de injeção desenvolvida utiliza três microcontroladores. Dentre os microcontroladores disponíveis no mercado, adequados para suportar o programa necessário para realizar o controle de injeção de hidrogênio, escolheu-se o microcontrolador Freescale (Motorola) MC908HC08QY. Este microcontrolador, além de possuir treze pinos programáveis como entrada ou saída e um pino somente como entrada, dispõe de um módulo interno contador – ou temporizador – de 16 bits. O microcontrolador dispõe, ainda, de dois canais que permitem capturar e comparar sinais, além de gerar uma modulação por largura de pulso (Pulse-Width Modulation – PWM). O microcontrolador é dotado de um conversor analógico/digital, executa interrupção por mudança de estado nos pinos de entrada e é facilmente programado em linguagem Assembly. Projetado para utilização em eletrônica embarcada em automóveis, o microcontrolador tem alta imunidade a ruídos irradiados, sendo esta a principal característica que definiu sua escolha.

A central eletrônica de injeção de gás combustível é constituída de três circuitos. O circuito 1 é constituído de um filtro e um regulador de tensão. Juntamente com o alternador e a bateria do motor diesel, o circuito 1 é a fonte de alimentação da central eletrônica. O circuito 1 reduz a tensão nominal da bateria de 12 V para 5 V, valor necessário para o adequado funcionamento dos circuitos integrados. A tensão nominal de funcionamento dos eletroinjetores é 12 V.

Para regular a tensão em 5 V utilizou-se o circuito integrado LM7805, que é um regulador linear fornecido por vários fabricantes e recomendado para correntes de

até 1 A. Este elemento possui proteção contra sobre-temperatura e curto-circuito e deve ser montado em um apropriado dissipador de calor. Capacitores de desacoplamento são necessários e são conectados entre a entrada e a saída e o filtro graduado de densidade neutra (GND). O diagrama do circuito regulador de tensão é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama do circuito regulador de tensão.



Durante a comutação das cargas acopladas ao gerador, uma flutuação na tensão elétrica gerada é produzida. Tais flutuações, se atingirem os microcontroladores através da tensão de alimentação de 5 V, podem comprometer o correto funcionamento dos mesmos e, até mesmo, danificá-los. A magnitude e a duração desses transientes são afetadas pelas características da carga. A Figura 6 mostra a flutuação da tensão produzida pelo gerador quando do desligamento de uma carga de 2,5 kW. Um filtro passivo foi utilizado para mitigar estas flutuações. Um desenho esquemático do circuito 1 é mostrado na Figura 7.

O circuito 2 contém o microcontrolador 2 e o microcontrolador 3. Esse circuito estabelece comunicação com o UPD-200, comanda os displays de 7 segmentos e é o centro de processamento dos dados onde são calculados os tempos de injeção. Ele é constituído de um oscilador eletrônico, capaz de produzir uma forma de onda periódica quadrada e sinal de frequência fixa de 20 MHz.

Trata-se de um circuito estável e tem a exatidão necessária para possibilitar a comunicação entre o microcontrolador 2 e o UPD-200, com a taxa de comunicação estabelecida.

Figura 6 – Transiente de tensão na bateria.

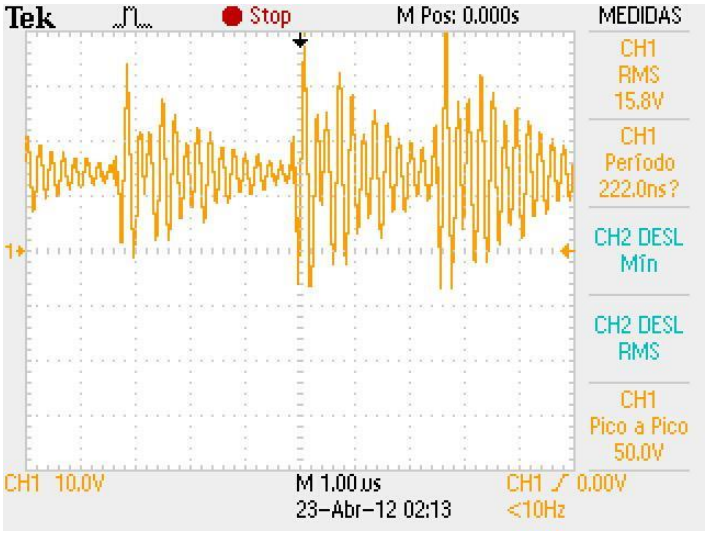
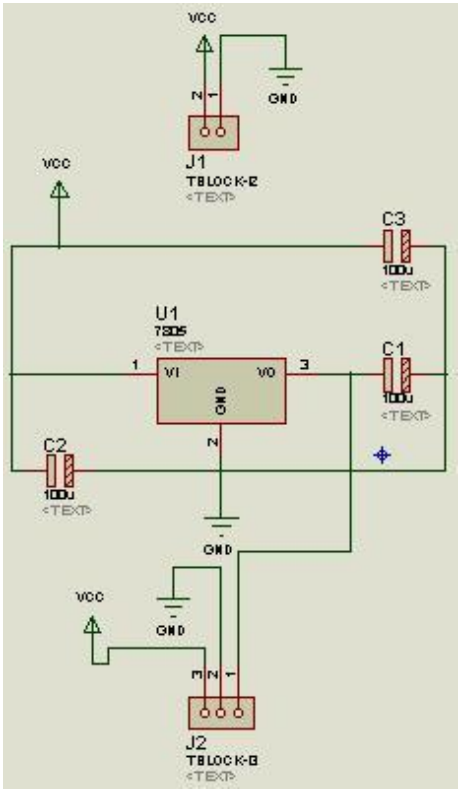


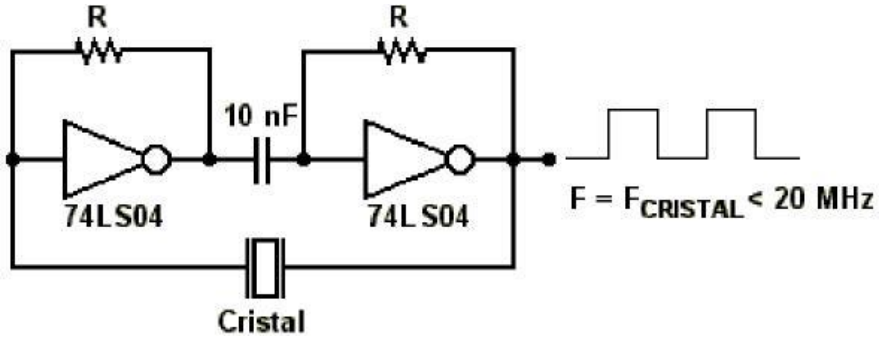
Figura 7 – Transiente de tensão na bateria.



O sinal de 20 MHz é obtido através de um oscilador controlado por um cristal de quartzo. O sinal gerado pelo cristal tem a forma alternada e é transformada em onda quadrada através de um circuito Schmitt-Trigger, para o qual se utilizou o circuito integrado 74LS04, que recebe o sinal senoidal do cristal e fornece uma forma de onda quadrada de 20 MHz e pico de tensão de 5V. O diagrama do oscilador é mostrado na Figura 8.

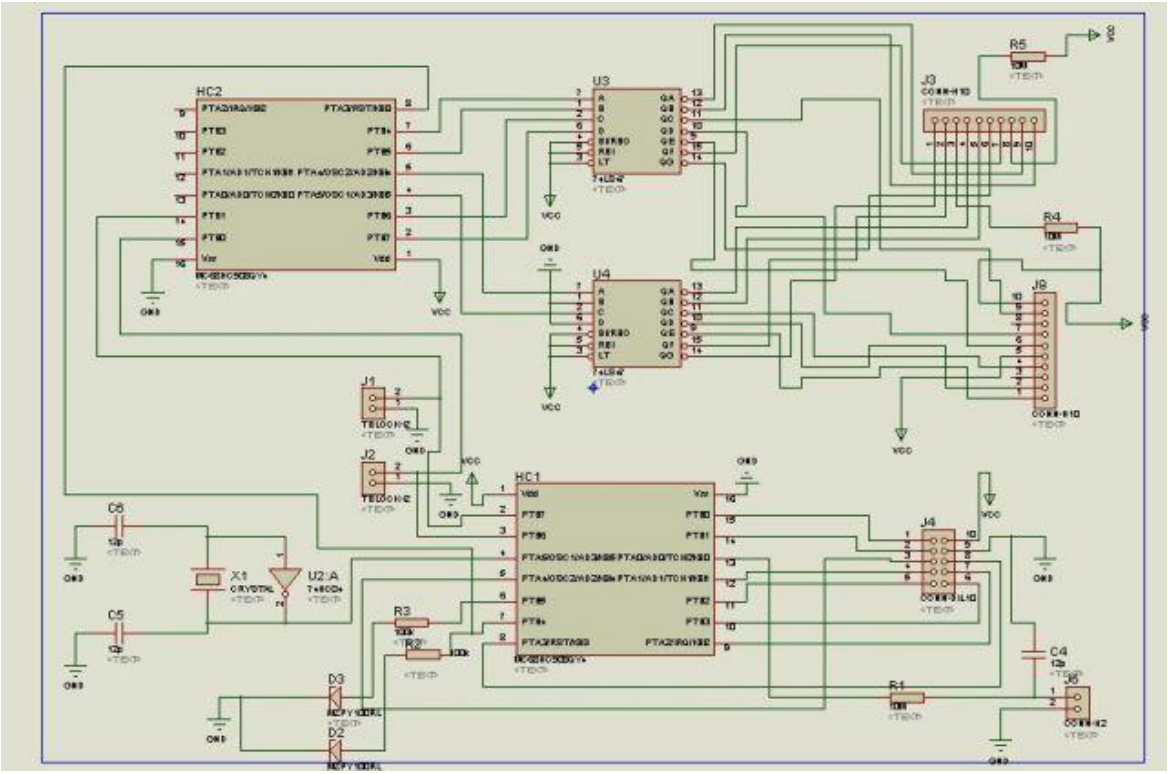
Encontra-se no circuito 2 três diodos emissores de luz e os botões de comando do percentual de substituição de combustível, o controlador 2 que executa os cálculos dos tempos de injeção, os displays de 7 segmentos, e o microcontrolador 3, que comanda estes displays.

Figura 8 – Diagrama do oscilador de 20 MHz [1].



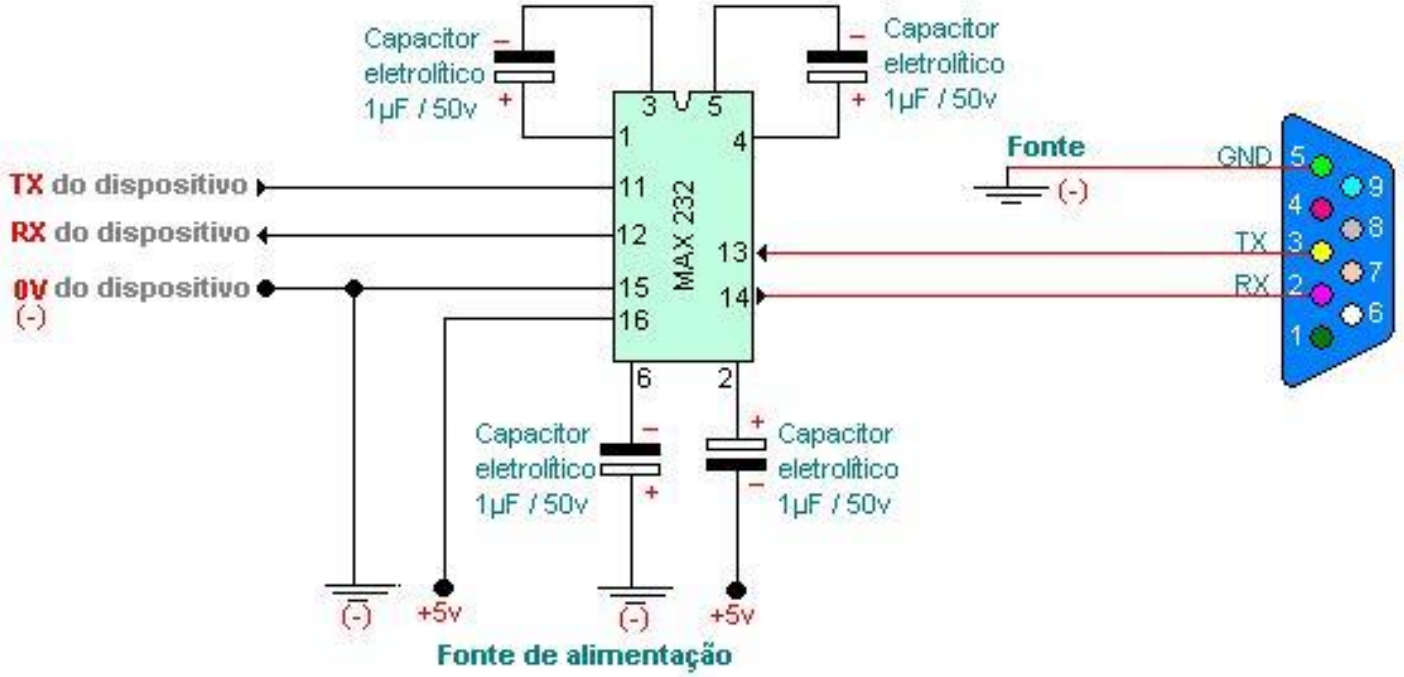
O diagrama do circuito 2 é mostrado na Figura 9. O circuito 2 é conectado ao circuito 3 através de um cabo flat, por onde transitam os dados da comunicação com o transdutor multivariável de grandezas elétricas UPD-200, os dados para envio do tempo de injeção para o microcontrolador 1 e a alimentação deste circuito.

Figura 9 – Diagrama do circuito 2.



O circuito 3 contém o microcontrolador 1, recebe informações do circuito 2, auxilia na comunicação com o transdutor UPD-200, comanda a abertura e fechamento dos eletroinjetores e contém a entrada dos sensores óptico e magnético. No circuito 3 montou-se a interface de comunicação entre a central eletrônica e o dispositivo UPD-200 utilizando-se o circuito integrado MAX232, de fabricação Maxim. Trata-se de um conversor de nível, que transforma os sinais de uma porta serial para sinais adequados para o uso em circuitos microprocessados. O MAX232 converte os níveis dos sinais de entrada da comunicação para 5 V. O receptor converte entradas EIA-232 para níveis de 5 V TTL/CMOS e o transmissor converte níveis de entrada TTL/CMOS em níveis EIA-232. O diagrama da Figura 10 mostra o circuito conversor com MAX232.

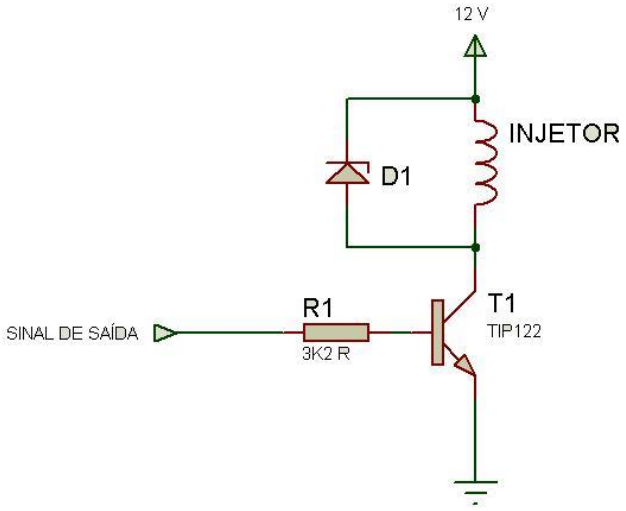
Figura 10 – Diagrama para comunicação serial [2].



O circuito 3 contém o microcontrolador de comando e a interface entre os eletro-injetores e sensores do sistema de injeção de hidrogênio. Os eletro injetores não podem ser acionados diretamente pelo microcontrolador por demandar cerca de 1,7 A de corrente de pico. Para acioná-los foram utilizados transistores Darlington, que apresentam alto ganho. Com estes componentes precisa-se de uma corrente muito menor na entrada para o acionamento de equipamentos de alta potência.

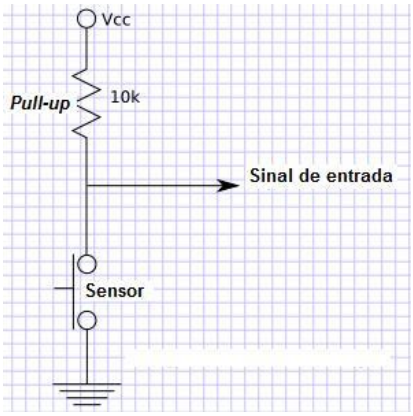
Os transistores recomendados são de potência (TIP 122), com dissipador de calor e/ou ventilação forçada. Os resistores que ligam o microcontrolador com o transistor servem para limitar a corrente de polarização dos transistores. Também é necessário inserir diodos em paralelo com os terminais dos injetores, evitando que uma corrente reversa seja descarregada no transistor, agindo como diodos de supressão. A Figura 11mostra o diagrama de acionamento dos eletro injetores.

Figura 11 – Diagrama do acionamento dos eletroinjetores.



Durante o desenvolvimento do projeto notou-se que o sinal do sensor magnético estava suscetível a ruídos externos, enquanto o motor estivesse desligado, ou seja, enquanto o sinal do sensor não estivesse sendo gerado. Para mitigar estes ruídos foi inserido um resistor de *pull-up* na linha do sinal que chega ao microcontrolador. Este resistor é usado na área de eletrônica para garantir que as entradas para os sistemas de lógica estejam no nível lógico desejado, ou seja, nível baixo (0 V) ou nível alto (+ Vcc). O resistor de *pull-up* faz com que o nível da linha do sinal esteja em nível lógico alto, enquanto o circuito do sensor estiver desconectado, ou flutuante. A Figura 12 ilustra a instalação do resistor de *pull-up*.

Figura 12 – Resistor de *pull-up*.



Para realizar as ligações entre os sensores e os eletro injetores e a central eletrônica, utilizou-se um conector do tipo DB15, cuja distribuição dos pinos se mostra a seguir:

- Pino 1: Acionamento do eletro injetor 1
- Pino 2: Acionamento do eletro injetor 2
- Pino 3: Acionamento do eletro injetor 3
- Pino 4: Acionamento do eletro injetor 4
- Pino 5: Não utilizado
- Pino 6: Conexão do sensor magnético (GND)
- Pino 7: Vcc = 14V
- Pino 8: Conexão do sensor magnético
- Pino 9: Conexão do sensor ótico (coletor)
- Pino 10: Conexão do sensor ótico (emissor) – GND
- Pino 11: Conexão do emissor de luz infravermelha (Vcc = 5V)
- Pino 12: Conexão do emissor de luz infravermelha (GND)
- Pino 13: GND
- Pino 14: GND
- Pino 15: GND

O diagrama do circuito 3 é mostrado na Figura 13. As placas de circuito construídas são mostradas na Figura 14 e a caixa utilizada para o protótipo é mostrada na Figura 15.

Figura 13 – Diagrama do circuito 3.

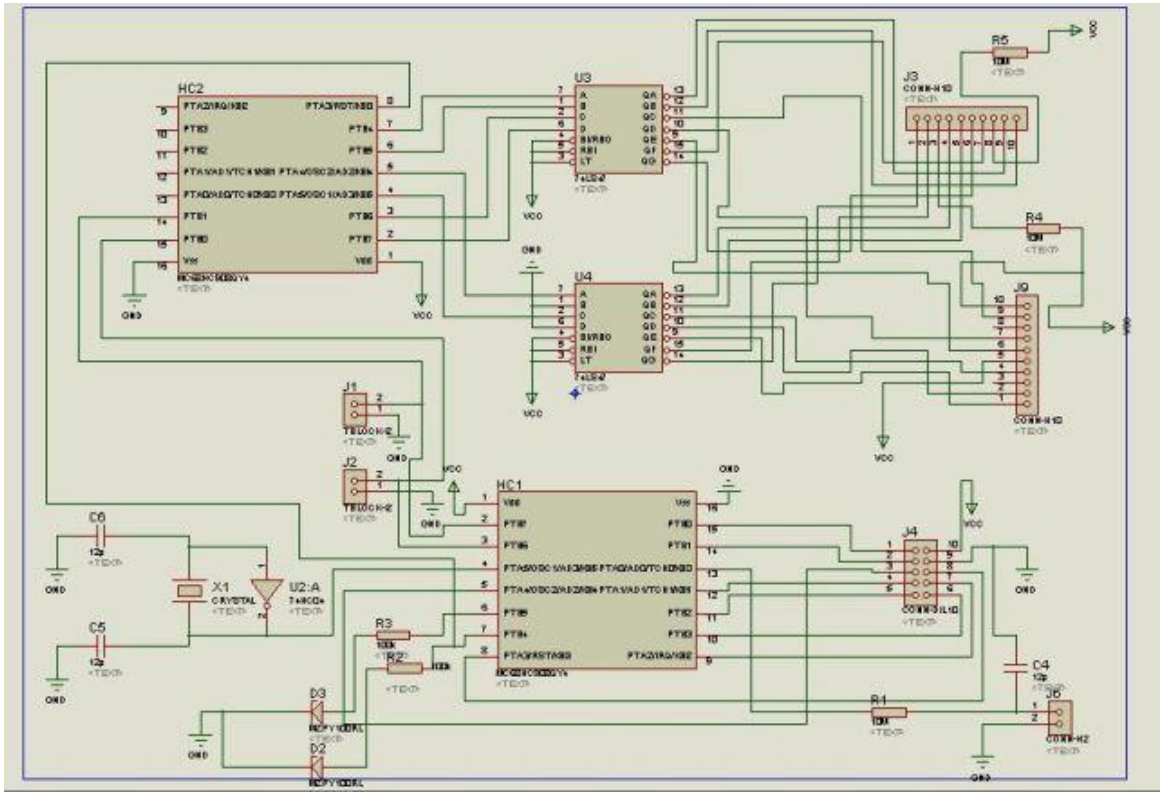


Figura 14 – Placas de circuito construídas.

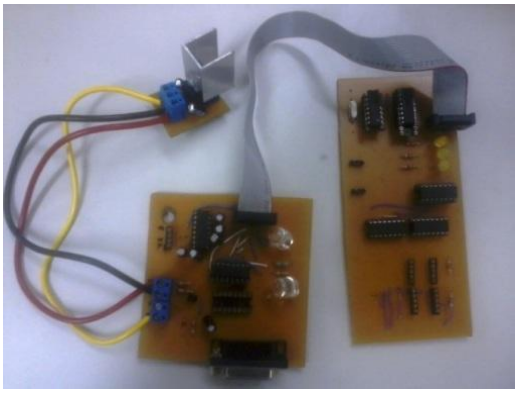


Figura 15 – Protótipo da central eletrônica de injeção de hidrogênio.

17.4 Testes da Central Eletrônica de Injeção de Hidrogênio em um Grupo Motor-Gerador

A unidade de controle eletrônico para injeção de hidrogênio foi montada em um grupo gerador formado por um motor de combustão interna do ciclo diesel e um gerador de energia elétrica. O motor é de fabricação MWM, série 229, modelo D229-4, cujas características são mostradas na Tabela I. Instalado no motor, encontra-se um acelerador eletrônico, com a função de manter a rotação constante em 1800 rpm. As Tabelas I e II mostram as características do motor e do gerador. A Figura 16 mostra uma vista do grupo moto-gerador. O grupo gerador utiliza-se de um banco de resistências de 50 kW como carga elétrica, em 220 V, agrupadas em módulos de 2,5 kW, 5 kW e 10 kW, de modo a permitir incremento de carga com valor mínimo de 2,5 kW. A Figura 17 mostra uma vista do banco de resistências. A Figura 18 mostra um diagrama contendo os principais equipamentos e instrumentos utilizados nos testes.

Para monitorar os sinais recebidos e enviados pelo sistema de injeção eletrônica utilizou-se um osciloscópio digital de fabricação Tektronix, modelo TDS-2012C (Figura 19). O aparelho tem largura de banda de 100 MHz, 2 canais e taxa de amostragem mínima de 2 GS/s por canal para medidas em tempo real. Uma inter-

face USB no painel frontal permite armazenamento em memória flash drive dos dados de forma de onda e imagens da tela.

Tabela I – Dados do motor diesel [3].

CARACTERÍSTICA	*TIPO OU VALOR*
Construção	Diesel – 4 tempos em linha
Injeção	Direta
Diâmetro x Curso	102 x 120 mm
Cilindrada unitária	0,980 litros
Número de cilindros	4
Cilindrada total	3,922 litros
Aspiração	Natural
Ordem de ignição	1-3-4-2

Tabela II – Características do gerador de energia elétrica [3].

CARACTERÍSTICA	*VALOR*
Nº de polos	4
Tensão (V)	220
Nº de fases	3
Potência contínua (kVA)	55
Frequência (Hz)	60

Figura 16 – Grupo motor-gerador.

Figura 17 – Banco de resistências elétricas.

Figura 18 – Diagrama dos equipamentos e instrumentos utilizados.

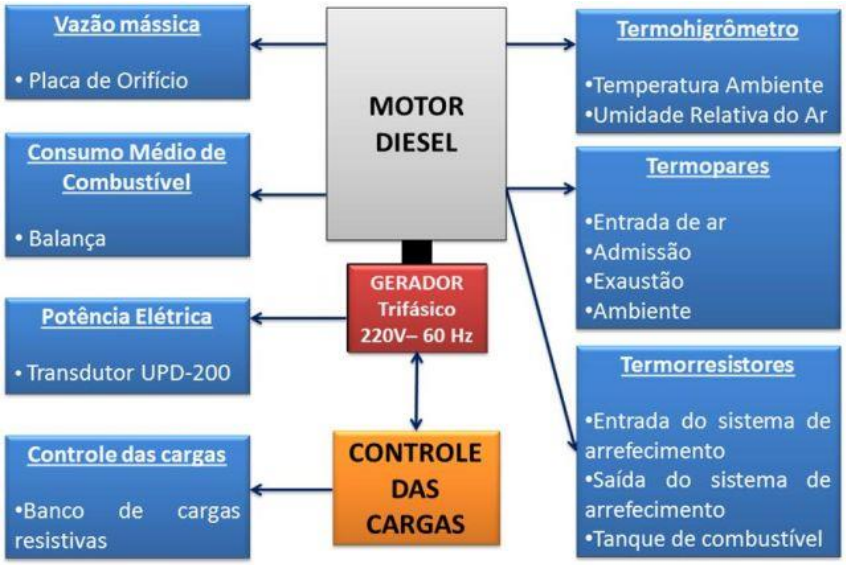
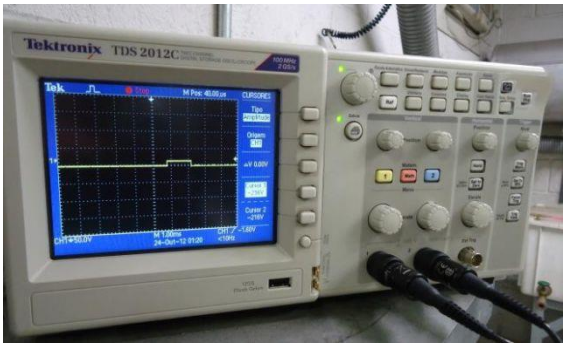
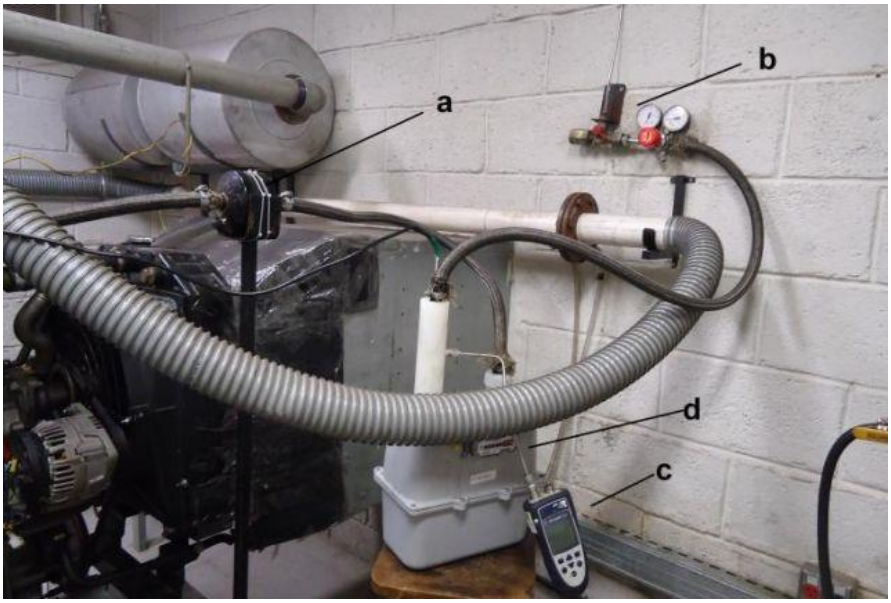


Figura 19 – Osciloscópio digital.



Para mensurar o consumo de hidrogênio durante os ensaios, utilizou-se um medidor de vazão volumétrica de diafragma de fabricação Itrón (Figura 20). O medidor tem faixa de medição de 0,060 (m³/h) a 10 (m³/h) e pressão máxima de trabalho de 100 (kPa). Instalou-se um regulador de pressão primário para reduzir a pressão de vazão do hidrogênio do cilindro. Um regulador de pressão secundário foi instalado para controlar a pressão de injeção de hidrogênio. A pressão controlada é mostrada por um manômetro digital, com resolução de 0,001 (bar). Entre o regulador de pressão secundário e as válvulas de injeção instalou-se um filtro "pulmão" (a), com função de reduzir e atenuar a variação da pressão no regulador de vazão secundário (b). A Figura 20 identifica ainda o manômetro digital (c) e o medidor de vazão volumétrica (d).

Figura 20 – Linha de fornecimento de hidrogênio.



A central foi configurada para a injeção de hidrogênio nas quantidades correspondentes a 5 %, 10 %, 15 % e 20 % da energia contida na massa total de combustível injetado, considerando também o óleo diesel. A injeção de hidrogênio inicia a partir do início do processo de admissão. Os tempos de abertura dos eletroinjetores para cada carga foram definidos considerando a quantidade de combustível gasoso correspondente à energia contida na massa de óleo diesel substituída e a pressão na linha de injeção de hidrogênio (tabelas III e IV).

Analisando o sistema de injeção eletrônica, foi verificado que as principais variáveis controláveis são o tempo de abertura dos eletroinjetores e a pressão de injeção do gás combustível considerando a saída como a vazão mássica do combustível gasoso. Os ensaios realizados permitiram a construção de matrizes experimentais. A Figura 21 mostra um conjunto de matrizes representando a vazão mássica de hidrogênio em função do tempo de abertura dos eletroinjetores e da pressão de injeção. Os resultados experimentais apresentados foram obtidos durante a calibração do sistema.

Tabela III – Condições de abertura dos eletroinjetores.

CONDIÇÃO	CONCENTRAÇÃO (%)	POTÊNCIA, P (kW)	PRESSÃO (kPa)
1	5	< 25	2
2	5	≥ 25	25
3	10	< 10	2
4	10	≥ 10	25
5	15	< 32,5	25
6	15	≥ 32,5	70
7	20	< 20	25
8	20	≥ 20	70

Tabela IV – Tempos de abertura dos eletroinjetores.

CONDIÇÃO	TEMPO DE ABERTURA, t (ms)
1	$t = 0{,}013P^2 + 0{,}193P + 0{,}725$
2	$t = 0{,}0017P^2 + 0{,}0586\,P - 0{,}11429$
3	$t = 0{,}98P + 4{,}9$
4	$t = 0{,}0048P^2 + 0{,}116P + 0{,}5233$
5	$t = 0{,}0052P^2 + 0{,}3233P + 1{,}0434$
6	$t = 0{,}012P^2 + 1{,}218P + 19{,}765$
7	$t = 0{,}01P^2 + 0{,}446P + 2{,}48$
8	$t = 0{,}0035P^2 + 0{,}2078P + 0{,}6208$

Figura 21 – Matriz de experimentos da calibração dos eletroinjetores.

$$[Tempo\ de\ abertura\ [ms]]\ \ [Pressão\ [kPa]] \ = \ \left[Vazão\ Mássica\ \left[\frac{kg}{h}\right]\right]$$

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} \quad [P_1\ P_2\ P_3] \quad = \quad \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 5{,}4 \\ 7{,}4 \\ 9{,}4 \\ 15{,}4 \end{bmatrix} \quad [25{,}0 \quad 70{,}0\ ] \quad = \quad \begin{bmatrix} 0{,}205 & 0{,}354 \\ 0{,}247 & 0{,}433 \\ 0{,}286 & 0{,}507 \\ 0{,}393 & 0{,}729 \end{bmatrix}$$

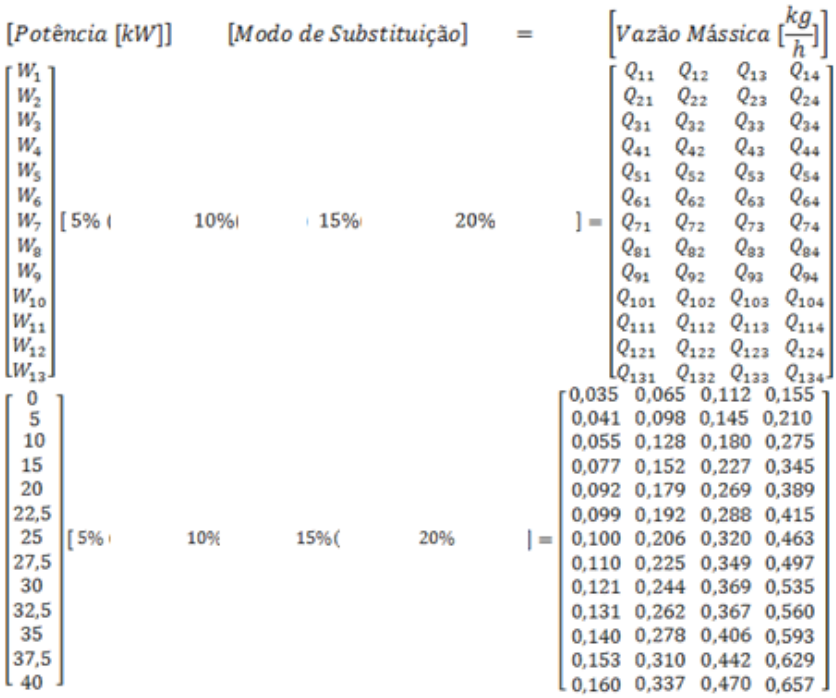
$$\begin{bmatrix} 1{,}4 \\ 6{,}0 \\ 8{,}0 \\ 10{,}0 \end{bmatrix} \quad [2{,}0\ ] \quad = \quad \begin{bmatrix} 0{,}041 \\ 0{,}077 \\ 0{,}089 \\ 0{,}097 \end{bmatrix}$$

Na Figura 21, t_a é o tempo abertura dos eletro injetores, representando a linha a da matriz de tempos. P_b é a pressão de injeção do hidrogênio, representando a coluna b da matriz de pressões. Q_{ab} é a vazão mássica de hidrogênio, resultante do experimento com o tempo de abertura da linha a da matriz de tempos e da pressão da coluna b da matriz de pressões.

Para o sistema de injeção eletrônica funcionar de forma adequada na injeção de um combustível gasoso, deve-se fazer um estudo do combustível e dos modos de substituição a serem utilizados. Os resultados do estudo devem ser equações que forneçam o tempo de abertura dos eletro injetores em função da carga de demanda do motor, do modo de substituição e da pressão de injeção do combustível. Estas equações são programadas no sistema, possibilitando o uso do combustível gasoso.

Baseado nos ensaios realizados com o sistema desenvolvido neste trabalho, matrizes de experimentos com o hidrogênio foram elaboradas. A Figura 22 mostra um conjunto de matrizes representando a vazão mássica de hidrogênio em função da potência de demanda do motor e da equação referente ao modo de substituição de combustível. Os resultados experimentais apresentados foram obtidos durante os ensaios no grupo motor/gerador. As equações referenciadas da matriz de modo de substituição são as apresentadas por [4].

Figura 22 – Matriz de experimentos no grupo motor-gerador.



Na Figura 22, W_a é a potência de demanda do motor, representando a linha a da matriz de potências. Q_{ab} é a vazão mássica de hidrogênio, resultante do experimento com a potência de demanda da linha a da matriz de potências e da equação de substituição da coluna b da matriz de modo de substituição.

Para a realização dos testes um sistema de aquisição de dados do motor e de controle das cargas elétricas aplicada foi desenvolvido utilizando a plataforma LabVIEW e uma placa de aquisição de dados NI-DAQ 6229. A aquisição de dados durante os testes se dá em tempo real. Os dados são adquiridos a uma taxa de um dado a cada 30 ms e são armazenados em planilhas dinâmicas que calculam média, desvio padrão, valor máximo e valor mínimo. Um painel frontal do sistema de aquisição de dados e de controle das cargas elétricas pode ser visto na Figura 23. A Figura 24 mostra detalhes do controle de cargas. O controle das cargas pode ser executado em três modos: manual, automático A e automático B. Os ciclos de inserção das cargas automáticos A e B são programados pelo operador. Devido à quantidade de informações que constitui o painel frontal, o operador pode configurar sua visualização a qualquer momento sem interferir na aquisição de dados ou no controle das cargas.

Durante a realização dos testes o motor foi inicialmente colocado em operação sem carga (0 kW) no modo padrão, ou seja, utilizando apenas óleo diesel B5 até que o mesmo atingisse a temperatura para abertura da válvula termostática, que é de aproximadamente 70 °C. Para se obter os testes na faixa mínima e máxima do motor do grupo gerador, ou seja, de 0 kW a 40 kW de energia elétrica convertida no gerador, optou-se por iniciar os testes em cargas decrescentes, iniciando em 40 kW. Nos testes utilizando a carga crescente, no modelo B5H0, constatou-se que, quando o motor operou na carga 40 kW, o sistema de arrefecimento se mostrou ineficiente, elevando a temperatura do motor para 95 °C, próximo ao máximo tolerável indicado pelo fabricante.

Figura 23 – Painel de controle das cargas elétricas e aquisição de dados.

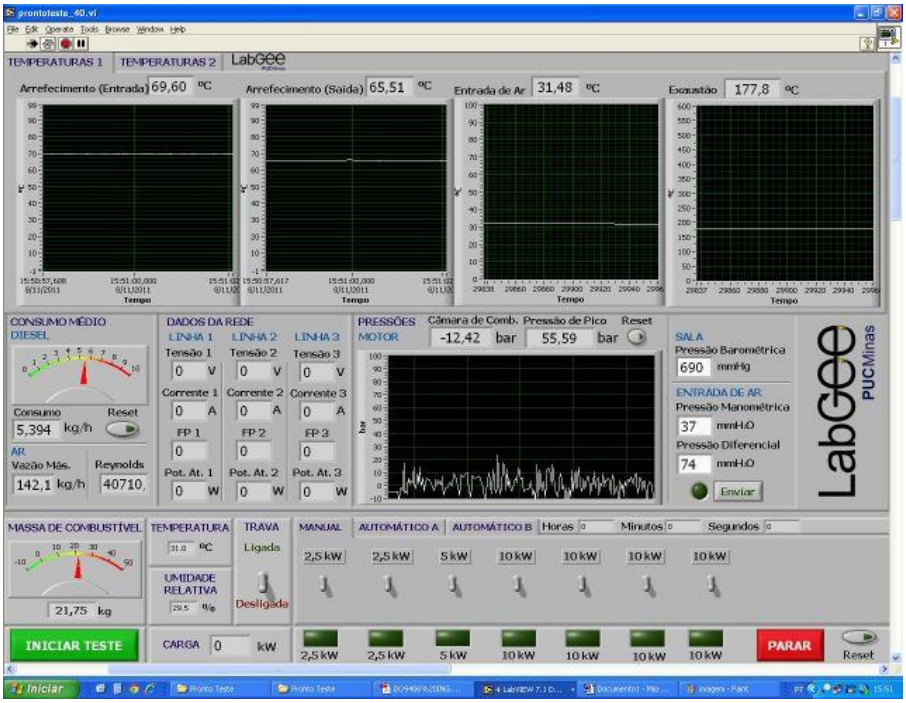


Figura 24 – Detalhe do painel de controle das cargas elétricas.

Os testes foram executados durante 3 minutos. Neste período executou-se a aquisição das principais grandezas dos experimentos variando-se a carga do motor. Nos resultados são levadas em conta as incertezas das medições, de acordo com a norma ISO 15550, conforme a tabela V. A não conformidade da incerteza da umidade relativa do ar se deu no modo B5H5, na carga 38,01 kW. A não conformidade do consumo de óleo diesel no modo bicombustível se deu com no modo B5H10 sem carga (0,00 kW).

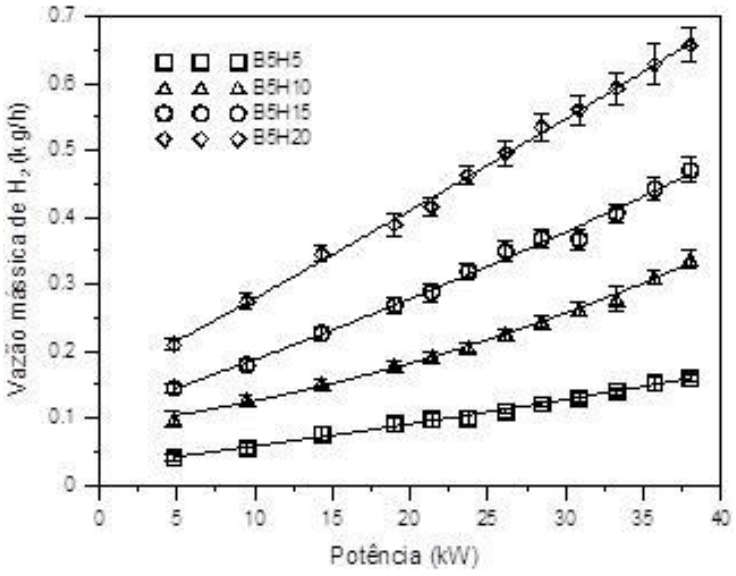
Tabela V – Incertezas normalizadas dos experimentos.

VARIÁVEL	INCERTEZA MÁXIMA MEDIDA	INCERTEZA MÁXIMA ISO 15550
Temperatura ambiente (°C)	1,71	2,0
Temperatura entrada de ar (°C)	1,77	2,0
Temperatura do ar admitido (°C)	1,91	2,0
Temperatura de exaustão (°C)	14,87	15,0
Umidade relativa do ar (%)	19,24	3,0
Vazão mássica de ar (kg/h)	2,29	7,20
Consumo de combustível (kg/h)	0,13	0,05

17.5 Resultados e Discussão

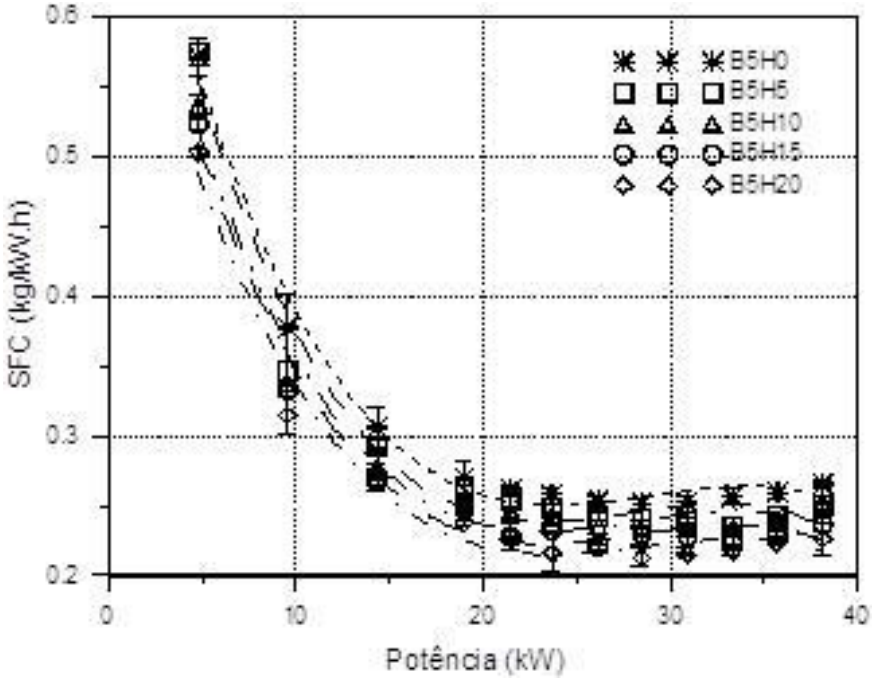
O hidrogênio injetado no coletor de admissão substitui parcialmente o óleo diesel injetado diretamente na câmara de combustão. As concentrações de hidrogênio utilizadas, baseado na energia presente na massa de óleo diesel (B5) substituída, foram de 5 % (B5H5), 10 % (B5H10), 15 % (B5H15) e 20 % (B5H20). Na Figura 25 é observado que a massa de hidrogênio injetada variou em função da pressão e do tempo de injeção conforme a carga acionada no motor.

Figura 25 – Variação da vazão mássica de hidrogênio (H_2) com a potência da carga aplicada no motor.



Para o cálculo do consumo específico foi levado em conta o consumo total. A massa de hidrogênio injetado no coletor de admissão do motor foi convertida em massa de óleo diesel considerando o poder calorífico inferior dos dois combustíveis. A partir da Figura 26 foi observada uma diminuição do consumo específico de combustível para os modos B5H10, B5H15 e B5H20 a partir da carga 0,0 kW até a carga 35,73 kW. Este mesmo comportamento foi observado para o modo B5H5 com as cargas 30,88 kW, 33,28 kW e 35,73 kW. O menor consumo específico do motor ocorre quando o gerador é carregado com 28,46 kW no modo B5H20. Neste modo o motor tem o consumo específico 15,3 % menor que no modo B5H0, com incerteza de 0,0069 kg/kWh. É possível observar que uma redução máxima de 12,0 % de consumo específico ocorreu ao se comparar os modos B5H0 e B5H20, utilizando a carga de 4,80 kW com incerteza de 0,0030 kg/kWh. Quando o motor foi carregado com 35,73 kW, os consumos nos modos de substituição mostraram valores próximos e dentro das faixas de incertezas, a exceção sendo apenas para o modo B5H0.

Figura 26 – Consumo específico modo padrão e bicombustível.

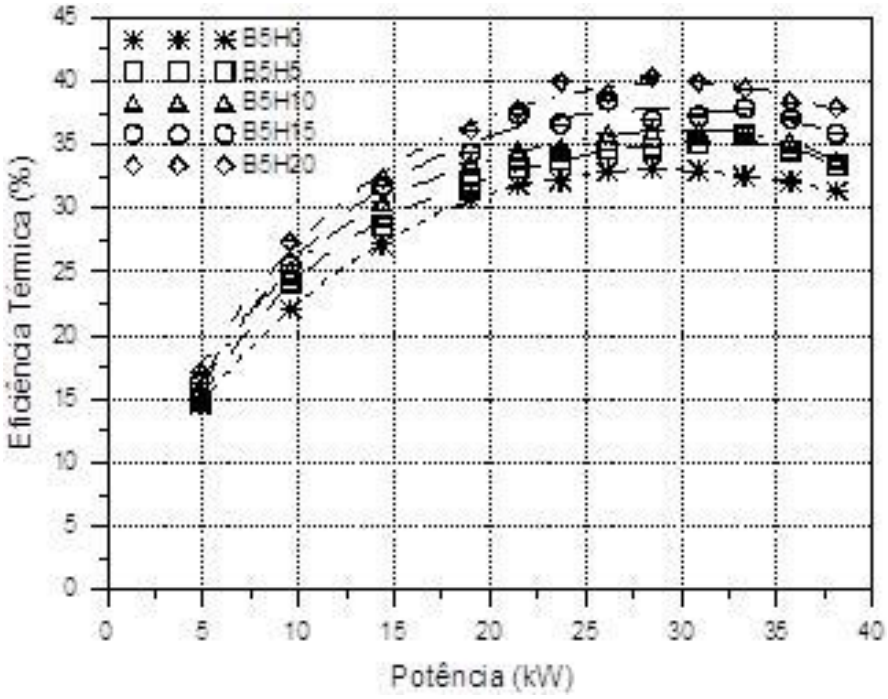


O cálculo da eficiência térmica do motor considera a energia do óleo diesel B5 e a energia do hidrogênio consumido no motor. A partir dos dados coletados observa-se que, a partir da carga 9,48 kW, ocorre o aumento da eficiência para todos os modos de operação comparado com o modo padrão (Figura 38). O motor operando no modo B5H5 aumentou a eficiência térmica em 9,5 %, comparado com o modo padrão na potência de 9,48 kW. Neste mesmo modo de operação o maior

aumento da eficiência térmica foi de 9,9 %, na carga 33,28 kW. Para o motor operando no modo B5H20, o aumento da eficiência se deu a partir da carga 4,80 kW, com aumento de 17,3 %, e o maior aumento foi de 23,9 %, na carga de 23,76 kW. Também se destacaram neste modo de operação o aumento da eficiência de 23,8 %, na carga 9,48 kW, e de 21,24 %, na carga 33,28 kW. Para os modos B5H10 e B5H5 não existiu aumento da eficiência térmica do motor quando carregado com 4,80 kW.

O aumento da eficiência térmica observado com o uso de hidrogênio se deu mantendo as características originais do motor operando no modo padrão, ou seja, manteve-se inalterado o ponto de injeção do óleo diesel. Para [5] as vantagens significativas do hidrogênio para o potencial aumento da eficiência térmica são devidas às diferenças no mecanismo de geração da entropia durante a combustão do hidrogênio e dos hidrocarbonetos. Constatou-se que, com o uso do hidrogênio, as irreversibilidades da combustão são reduzidas. O aumento da adição de hidrogênio na mistura reduz a irreversibilidade produzida durante a combustão do B5, resultando no aumento da eficiência da 2ª Lei da Termodinâmica.

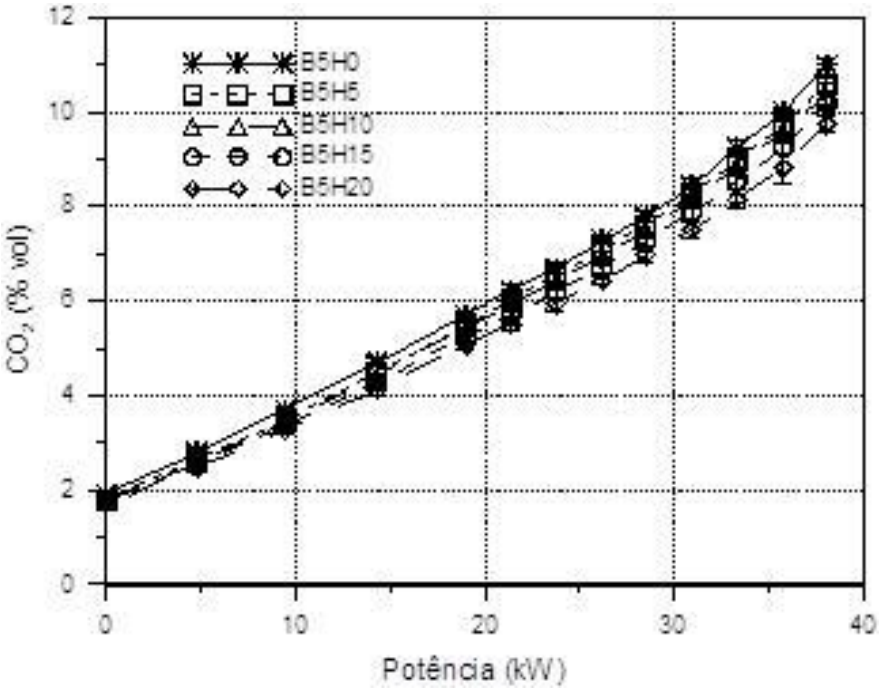
Figura 27 – Variação da eficiência térmica com a potência da carga aplicada ao motor.



No motor diesel existe uma tendência para aumentar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) quando o ar disponível para o óleo diesel tende à razão estequiométrica. Observa-se na Figura 28 o aumento da concentração de CO_2 com o au-

mento da carga aplicada ao motor. No modo bicombustível, com o aumento da carga aumenta-se a massa de hidrogênio, reduzindo a massa de óleo diesel injetada no cilindro. Assim, a diminuição de consumo do óleo diesel é favorável à diminuição da formação do CO_2. A combustão do hidrogênio não produz monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarbonetos (HC), óxido de enxofre (SO), fuligem e benzeno. Obtêm-se na combustão o vapor de água e óxidos de nitrogênio (NOX) [6]. Ao se comparar a emissão de CO2 do modo padrão de operação com os outros modos, observa-se que todos os modos de substituição produziram menor quantidade de CO_2 a partir da carga 14,30 kW.

Figura 28 – Variação da emissão de dióxido de carbono (CO_2) com a potência da carga aplicada ao motor.



17.6 Conclusões

Baseado nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser observadas:

- Pode ser realizada a substituição de até 20 % da energia contida na massa do óleo diesel por massa de hidrogênio com energia equivalente;
- Os testes mostraram que o consumo de combustível do motor, em geral, diminui quando este é alimentado com hidrogênio;
- Para o motor operando sem carga, não se notou redução expressiva do consumo de óleo diesel quando comparado com o modo B5H0;

- O motor apresentou o menor consumo específico de combustível no modo B5H20, quando o gerador foi carregado com cerca de 2/3 da carga máxima (28,46 kW);
- Quando comparado com o modo padrão, os índices de CO_2 foram menores para todos os modos de substituição e sua quantidade diminui com o aumento do percentual de substituição.

Este projeto, além de desenvolver um protótipo funcional aplicável a grupo motogeradores, possibilitando a utilização de hidrogênio como combustível e o desenvolvimento do hidrogênio como vetor energético, teve ainda os seguintes benefícios:

- Formação de recursos humanos capacitados para lidar com este tipo de tecnologia, inclusive dentro das concessionárias de energia;
- Contribuição ao reconhecimento com centro de excelência em motores à PUC/MG, gerando demandas por serviços de consultoria. Alguns dos equipamentos utilizados neste projeto permanecerão no laboratório de motores, contribuindo para o ensino e pesquisa da instituição, com reflexos significativos para a sociedade;
- A Cemig se beneficiou deste projeto, na medida em que acompanhou, de perto, o desenvolvimento do projeto, subsidiando o posicionamento estratégico associado ao hidrogênio como vetor energético e também nas tecnologias de motogeradores.

Realizando-se o confronto dos resultados com os objetivos propostos pelo projeto, fica evidente que do ponto de vista técnico o projeto foi um sucesso. Entretanto, considerando-se as dificuldades próprias das tecnologias de hidrogênio, a aplicação e popularização dos resultados deste projeto se mostram limitados.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se: o estudo de aplicabilidade do protótipo desenvolvido em motores veiculares e o desenvolvimento de um motor onde as possibilidades de aplicação do hidrogênio energético tenham como objetivo o máximo desempenho com este energético.

Capítulo 18

Capítulo 18: Desenvolvimento do Conjunto Motogerador Movido a Álcool Etílico Hidratado[18]

***Resumo*- O uso de álcool como energético tem se tornado de grande importância, agregando soberania energética e sustentabilidade. Além disso, a exploração deste energético em propriedades de pequeno porte pode contribuir significativamente para o desenvolvimento social. Neste sentido foi feito o desenvolvimento do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento – P&D nº119 (Código Aneel 0049-062/2003) denominado "Conjunto Motogerador de Eletricidade Usando Motor de Combustão Interna Movido a Álcool Hidratado", executado pelo Laboratório de Ensaios de Motores (LEM), da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Este artigo trata das informações relativas ao desenvolvimento do projeto e apresenta os ensaios realizados no motogerador de 30 kW. Os resultados mostram que o motor apresenta bom desempenho em termos de torque e potência na rotação de 3600 rpm, típica para aplicação em motogeradores. As análises dos testes operacionais indicam que o conjunto motogerador está pronto e funcional.**

18.1 Introdução

A utilização da energia é sem dúvida um dos pilares da sociedade moderna. O uso dos recursos naturais possibilita a elaboração de bens e serviços, gerando mais renda e qualidade de vida. Na situação atual, onde as pessoas estão conectadas à internet, usando seus computadores e celulares, a possibilidade da falta deste recurso tão essencial que é a energia elétrica é capaz de gerar um grande incomodo.

O foco dos sistemas tem se voltado para temas como a sustentabilidade, o meio ambiente e as energias renováveis. Entretanto é necessário relembra r que tais conceitos, apesar de bastante discutidos e divulgados na atualidade, somente entraram de fato na pauta de discussões globais na década de 1990. A constatação de que os recursos naturais não seriam de fato infinitos somente foi realizada em 1970, percebendo-se também a ideia de que é preciso dosar as necessidades para que não se comprometa a capacidade das gerações futuras de saciar as suas próprias necessidades. Destas constatações, indica-se que uma mudança no modelo de consumo juntamente com a eficientização energética podem contribuir para o encaminhamento da questão energética.

A utilização de etanol de forma energética no Brasil ocorreu, de forma pioneira no mundo, durante a crise do petróleo da década de 1970. O grande desafio que se apresenta é o de conciliar, de forma sustentável, dois elementos essenciais à sobrevivência da humanidade: a soberania energética e a segurança alimentar. O

[18] TORRES, É. S.; SILVA; C. H. F da, CARVALHO, A. M.; SILVA, J. E.; RODRIGUES, V. F.. Publicado em VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

Brasil tem demonstrado ao mundo que é possível alcançar simultaneamente esses objetivos estratégicos, sem abrir mão da proteção da Amazônia de sua rica biodiversidade [1]. Os resultados do Brasil indicam claramente que o aumento da produção de álcool combustível não tem sido obtido em detrimento da produção de alimentos. Torna-se importante ressaltar que o aumento da área plantada de cana-de-açucar não restringiu o cultivo de alimentos sofrendo ainda significativos melhoramentos tecnológicos, acarretando assim aumentos sucessivos de safra e produtividade. O mundo ainda não foi capaz de adaptar-se a outra fonte energética mais limpa e renovável, contudo, o nosso país demonstrou ser mais aberto às inovações tecnologico-culturais do que os demais países. O surgimento dos veículos bicombustíveis é um bom exemplo dessa adaptabilidade de consumo do brasileiro.

A cana-de-açúcar pode preferencialmente ocupar áreas de pastagens degradadas e que já foram impactadas ambientalmente, adquirindo assim um importante papel social e econômico. Papel este que também pode ser observado no cultivo desta cultura para subsistência.

A indústria sucroalcooleira ainda não se apropriou de toda a potencialidade da cadeia produtiva da cana. Ela extrai o açúcar e o álcool, que se trata de energias nas formas sólidas e líquidas, e despreza toda a energia contida na biomassa remanescente, que pode ser transformada ainda em calor, vapor e energia elétrica. A cogeração do setor sucroalcooleiro tem sido uma importante opção de incremento de energia no sistema elétrico no momento atual e vem atuando de forma decisiva na eficiência da cadeia produtiva da cana. Para o futuro existem grandes expectativas inclusive com o desenvolvimento de tecnologias de produção de etanol celulósico, que possibilitaria que se dobrasse a produção deste combustível usando para isso o bagaço.

A carência no suprimento de energia elétrica para consumidores individuais e comunidades localizadas em regiões rurais pobres e distantes da rede de distribuição da concessionária é o principal motivo que leva à avaliação da alternativa de geração de energia, via conjuntos motogeradores a álcool, para atender a esse tipo de consumidor [2]. Em regiões onde as condições climáticas favorecem o cultivo da cana de açúcar, tornando essa cultura uma alternativa viável para geração de emprego e renda, a possibilidade de geração de energia elétrica a partir do álcool etílico de cana, em ciclo combinado com produção de aguardente e rapadura é uma realidade. Ressalta-se que um dos problemas graves nessas regiões é a falta de energia elétrica, quer seja para mover as máquinas das próprias micro destilarias (engenho, picadores de cana e bombas), quer seja para o uso doméstico na iluminação e alimentação de aparelhos básicos, como rádio, televisão e geladeira.

Sendo o álcool um item de produção local, que pode ser produzido a um custo otimizado no processo combinado, seu emprego na geração de energia elétrica para uso na propriedade ou em pequenas comunidades, é uma alternativa economicamente viável, ecologicamente compatível, podendo se tornar em uma opção estratégica de governo para a melhoria do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de regiões onde esse problema é acentuado.

A seção 18.2 apresenta o Projeto de P&D Cemig/Aneel onde foi montado e testado o grupo motor gerador movido a etanol hidratado. A seção 18.3 apresenta a metodologia utilizada. Na seção 18.4 encontram-se aspectos construtivos do grupo motor gerador. Na seção 18.5 são mostrados os principais resultados dos testes no grupo. Na seção 18.6 é feita as discussões acerca dos resultados. As conclusões do trabalho encontram-se na seção 18.7 e no Capítulo 33 estão as referências bibliográficas para a elaboração deste artigo.

18.2 Projeto de P&D CEMIG/ANEEL Nº 141

Este projeto faz parte do ciclo 2002/2003. Ele teve início em 2004 e foi encerrado em 2007. Resultou da parceria entre a Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais (CETEC) e a Cemig Distribuição S.A. Os seus principais objetivos foram [3]:

- Projetar, montar e avaliar o desempenho técnico e operacional de um conjunto motogerador acionado por um motor automotivo a álcool, em ambiente de laboratório e campo.

Têm-se, ainda, os seguintes objetivos específicos: qualificar e quantificar parâmetros técnicos, econômicos e operacionais relativos ao consumo de álcool, estabilidade das variáveis elétricas, desempenho dos componentes eletromecânicos, desgastes e vida útil do motogerador; executar testes de campo para comprovação do desempenho operacional do conjunto motogerador quando operado por usuários típicos.

A. Benefícios do projeto

Dentre as expectativas deste projeto, encontram-se principalmente os seguintes benefícios [3]:

- Viabilização do suprimento de energia elétrica a pequenos consumidores, localizados a grandes distancias das redes de distribuição, via fonte renovável e ecologicamente correta. É uma contribuição ao desenvolvimento social e regional para área de atuação da empresa;
- Para o CETEC este desenvolvimento é relevante por implicar no projeto e construção de um produto estratégico, sem similar nacional, que requer desenvolvimento e inovação em várias de suas partes e componentes.

18.3 Metodologia

Para o desenvolvimento desse projeto as diversas atividades necessárias foram identificadas e agrupadas em 13 fases citadas abaixo [4]:

- Fase 1 – Estudo de revisão de dados e informações relativas aos assuntos centrais do projeto;
- Fase 2 – Elaboração de lista detalhada com quantitativo e especificações dos principais equipamentos, partes de equipamentos, peças e outros materiais necessários à montagem do conjunto motogerador;

- Fase 3 - Montagem do núcleo principal do motor automotivo e realização de seu amaciamento funcional em bancada dinanométrica de ensaios de motores, incluindo a obtenção das curvas iniciais de torque, potência, consumo e as respectivas avaliações de seu desempenho;
- Fase 4 – Elaboração do projeto mecânico construtivo e a subsequente construção da base mecânica de suporte para o conjunto motogerador, incluindo os elementos de fixação para todos os componentes do conjunto e os respectivos meios para sua transportabilidade;
- Fase 5 – Elaboração do projeto construtivo para integração do motor ao gerador, com a compra dos itens para o respectivo acoplamento;
- Fase 6 - Elaboração do projeto construtivo e a montagem do painel eletroeletrônico de comando do conjunto motogerador, integrando em painel elétrico único as diversas funções de comando, chaveamento e indicação das variáveis envolvidas na operação;
- Fase 7 - Elaboração dos projetos construtivos complementares (carcaças e outros dispositivos finais de adequação da montagem) e montagem ou configuração de dispositivos simuladores de carga para o ensaio de desempenho do conjunto motogerador;
- Fase 8 - Execução dos ensaios iniciais preliminares (testes operacionais parciais do conjunto), incluindo ajustes elétricos e mecânicos iniciais;
- Fase 9 - Execução de ensaios complementares para verificação do desempenho e da operacionalidade do conjunto moto-gerador, visando seu uso por pessoas com baixa qualificação em eletromecânica;
- Fase 10 - Execução de um ciclo curto de rodagem do conjunto motogerador visando à avaliação do desempenho e de funcionalidade de média duração, utilizando o dispositivo simulador de carga para avaliar a resposta do conjunto às alterações de carga;
- Fase 11- Execução de um ciclo de rodagem para avaliação da durabilidade. Se for possível, utilizar álcool de diferentes qualidades, inclusive álcool produzido em microdestilarias que não têm seu produto controlado pela Agência Nacional de Combustíveis (ANP);
- Fase 12 - Elaboração dos desenhos finais e corridos "as Built" de toda a montagem;
- Fase 13 – Avaliação final.

18.4 Descrições e Avaliações Sobre os Principais Componentes do Conjunto Motogerador

Estão divididos em subitens os componentes do conjunto motogerador e as avaliações dos mesmos.

A. Escolha do Motor Automotivo

A referência [4] mostra aspectos técnicos e econômicos relativos à construção de grupos motogeradores, movidos por motores automotivos alimentados com álcool etílico, e os estudos envolvidos na primeira fase do desenvolvimento desse projeto, que subsidiaram a definição do grupo motogerador trifásico, com potência entre 20 e 30 kW.

Foram avaliadas várias marcas de motores, tais como os das marcas Fiat, GM, Ford, Renault ou Peugeot, dentre outras. A decisão pelo motor de marca VW foi tomada, em parte, devido ao conhecimento técnico da equipe envolvida nesse projeto e também pela existência no Laboratório Ensaios de Motores do CETEC de um bom número das peças e partes componentes desse motor, bem como de muitos outros acessórios compatíveis e necessários. A Figura 1 mostra a montagem do motor no suporte.

B. Escolha do Gerador de Energia

Para a escolha do gerador de energia foram consideradas as seguintes características principais:

- Disponibilidade para compra do equipamento no mercado mineiro;
- Ser de potência compatível com o motor automotivo de 1000 cm³, 20-30 kW, trifásico, 220 VCA-60 Hz;
- Robustez operacional, expressa por expectativa de baixo número de falhas por horas de operação;
- Ter qualidade assegurada, considerando-se a conceituação no mercado;
- Ampla rede de assistência técnica em Minas Gerais e no país.

Figura 1 – Grupo motor-gerador a álcool hidratado montado no projeto.

A partir dessas considerações optou-se por um gerador dotado coma as seguintes características funcionais básicas:

- Marca: Kohlbach;
- Número de pólos: 2 pólos;
- Potência nominal: 30 kVA;
- Rotação nominal: 3600 rpm;
- Tensão: 220 VCA trifásico, com 220 VCA entre fase-fase e 127 VCA entre fase-neutro;
- Frequência: 60 Hz e regulador eletrônico de tensão;
- Outros: dotado com dispositivo interno para regulagem automática de tensão.

Na Figura 2 observa-se o gerador e a Figura 3 mostra a montagem realizada do conjunto motor-gerador. Na Tabela 1 são indicados os principais componentes utilizados para esta montagem.

Figura 2 – Grupo motor-gerador à álcool hidratado montado no projeto.

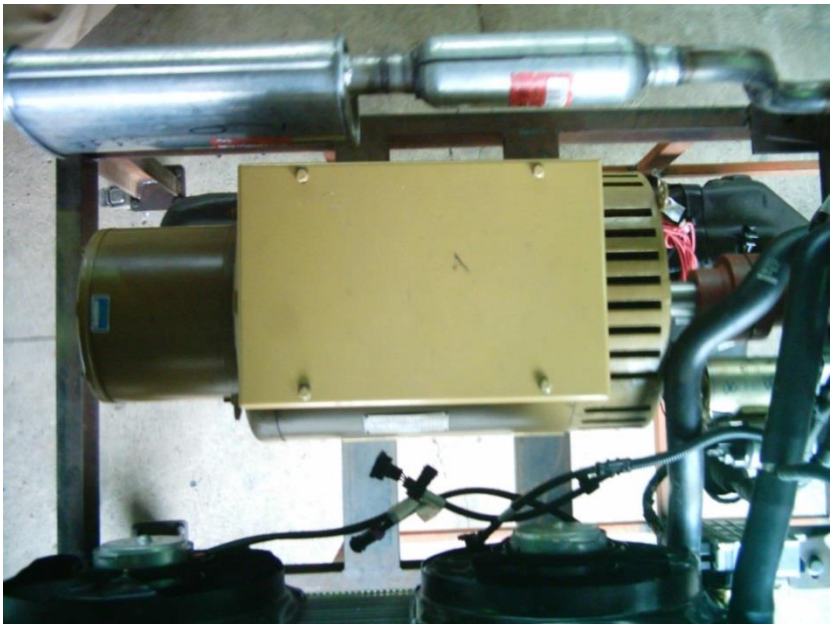


Figura 3 – Grupo motor-gerador à álcool hidratado montado no projeto.

Tabela I – Principais itens utilizados no conjunto motogerador.

Quantidade	Descrição
1 peça	Acoplamento mecânico para interligação motor-gerador.
1 peça	Gerador elétrico, trifásico, potência de 30 kVA, 2 pólos, 3600 rpm, marca Kolbach
300 kg	Matéria prima para transformação mecânica (chapas metálicas, perfis de aço, tarugos para usinagem de peças).
1 conj.	Motor automotivo da marca Volkswagen AT100, a álcool, de 1000 cm^3 com acessórios fundamentais.
1 kit	Regulador eletrônico de velocidade para motor automotivo, marca Woodward, modelo DPG 2201-002 e atuador modelo APECS0300-12E3-LS1
1 peça	Sensor de temperatura e de pressão do óleo.
1 unid.	Unidade de controle eletrônico e aquisição de dados do motor (centralina)
1 kit	Conjunto de peças para montagem do sistema de escapamento para motor.
1 kit	Conjunto de peças para montagem do sistema de arrefecimento do motor (radiador, ventilador, termostato, etc.).
1 kit	Motor e arranque e seus periféricos.
1 peça	Bateria automotiva, fechada, 12VCC, 50 A.h.
1 kit	Braçadeiras, parafusos, rebites e assemelhados.

C. Projeto da Base Mecânica de Sustentação do Conjunto Motogerador

O conjunto motogerador foi concebido para ser instalado em uma base de sustentação projetada para assegurar a integração de todos os componentes do conjunto e, ainda, permitir sua fácil movimentação no local de instalação sem o uso de outras estruturas adicionais.

Os aspectos de mobilidade e segurança para as pessoas foram considerados como fatores críticos em todas as definições para o projeto. Para atender a estes requisitos a estrutura é apoiada sobre rodas e conta com um conjunto de proteções para impedir o livre acesso às partes girantes, notadamente nas áreas de acoplamento do motor com o gerador.

Em termos mecânicos a estrutura de sustentação é constituída, basicamente, por duas vigas principais, sobre as quais são fixados os suportes especiais para alinhamento do conjunto motor-gerador, e por colunas nas quais se apoia o painel de controle. A complexidade na elaboração do projeto e confecção das partes reside no correto posicionamento dos equipamentos principais de um vasto número de acessórios, que se interligam por componentes fixos, muitas vezes com baixa ou nenhuma capacidade para aceitar ajuste devido a falhas de posicionamento.

D. Controle de Rotação do Conjunto

O ótimo controle da rotação do conjunto motogerador é uma das exigências considerada determinante para assegurar o bom funcionamento do conjunto e garantir a

boa qualidade da energia gerada. Esta variável está diretamente vinculada à frequência do ciclo de tensão e afeta diversos aspectos no uso da energia. Esse foi um dos aspectos mais bem avaliados na fase conceitual do projeto e se apresentou como um dos pontos de maior dificuldade construtiva. Por último, foi o parâmetro que tornou mais problemático a fase final de testes do conjunto motogerador, indicando a necessidade de implementação de melhorias futuras no protótipo construído e em outros equipamentos que possam vir a ser montados seguindo essa mesma linha de projeto.

É importante ressaltar que foram identificados diversos tipos de dispositivos controladores de rotação para serem empregados em sistemas motogeradores. Todavia, não foram encontrados modelos específicos para operarem com motores a álcool, o que levou a equipe do projeto a optar pela busca de adaptações em um tipo de dispositivo estrangeiro usado em motores a gasolina, da marca Woodward.

As principais características do dispositivo adquirido para atuar no controle eletrônico de rotação são as seguintes:

- Marca: Woodward;
- Modelo: Modelo DPG 2201-002;
- Leitura de velocidade de rotação: de 10 Hz a 14000 Hz;
- Controle de velocidade de rotação: de 500 Hz a 11000 Hz;
- Programação: ajuste dos parâmetros de controle PID (proporcional, integral e derivativo), via painel frontal ou via *software* rodando em computador;
- Sensor de rotação: pick-up magnético, posicionado em algum ponto do eixo de acoplamento motor-gerador;
- Atuador: Atuador linear de tração, marca Woodward, modelo APECS 0300-12E3LS1 operado pelo princípio da atuação de força magnética sobre núcleo magnético (princípio de solenóide), conectado à haste de giro da borboleta de entrada de ar do motor através de um cabo de aço com curso de (25,4mm). A força nominal esperada era de 66,7 N;
- Medição: Valores *true* RMS da tensão e da corrente nas 3 fases do gerador; medição da potência em kW e da rotação;
- Proteções disponibilizadas: contra sobre rotação; contra queda da tensão da bateria; contra sub e sobre tensão; contra sub e sobre frequência do gerador; contra sobrecarga; contra potência reversa e induzida; contra desbalanceamento de carga; contra sobre corrente instantânea e temporizada; contra falha de curto-circuito para terra;
- Outros: contagem de tempo de operação, partidas e manutenção, histórico de eventos, relógio em tempo real, alarmes configuráveis e senhas;

- Visualização dos parâmetros: pelo próprio visor frontal com tela LCD gráfica, ou por intermédio de computador externo conectado via cabo.

A Figura 4 mostra o dispositivo utilizado.

Figura 4 – Controlador de rotação Woodward.

E. Acoplamento Motogerador

O acoplamento mecânico entre o motor automotivo e o gerador de eletricidade não poderia ser feito de forma rígida, visto se tratar de dois componentes pesados, que devem operar alinhados, mas que, por razões mecânicas, têm fixações próprias e independentes sobre a estrutura de sustentação.

Após diversos estudos, optou-se por executar o acoplamento do motor automotivo com o gerador por uma forma indireta, utilizando um dispositivo de acoplamento flexível, apropriado para absorver os desalinhamentos residuais existentes entre os eixos dessas duas partes. Como função secundária, o acoplamento flexível também foi aplicado para minimizar os transientes de força mecânica existentes entre o motor e o gerador. A Figura 5 mostra o acoplamento construído.

Figura 5 – Acoplamento motor-gerador.

F. Artefatos para Simulação de Cargas

Para realizar os ensaios operacionais de laboratório do conjunto motogerador foi necessário configurar um arranjo para simular cargas reais, de modo a submeter o motogerador a demandas próximas aquelas que serão exigidas no uso previsto. O arranjo montado foi configurado com três artefatos de cargas resistivas, com ajuste variável, todos da marca Triel, modelo CR-60 de 115 V, 60 A, 60 Hz. Na Figura 6 podem ser observadas as cargas resistivas utilizada nos testes.

Figura 6 – Cargas resistivas.

G. Painel de controle eletroeletrônico

Foi utilizada uma caixa metálica para montagem elétrica com vedação IP55, posicionada sobre o dorso do grupo motogerador. Nessa caixa foram instalados vários dos principais componentes elétricos vinculados às ações de chaveamento, proteção, visualização e parâmetros e outros comandos necessários ao uso da energia elétrica produzida. Dentre esses principais componentes destaca-se uma chave contactora de 100A de acionamento da energia para carga, os transformadores de corrente que alimentam o módulo de controle Woodward DPG 2201-00X, indicadores, barramento de contatos elétricos e outros acessórios de interligação.

H. Outros Componentes

Embora nos itens anteriores sejam descritos os principais componentes do conjunto motogerador, é importante relatar que a construção deste conjunto exigiu um grande número de outras partes, tais como:

a) Tanque combustível;

b) Unidade de controle eletrônico do motor;

c) Sistema de arrefecimento;

d) Dispositivos elétricos de partida e ignição.

Na Figura 7 é mostrado o tanque de combustível e na Figura 8 é apresentado o sistema de refrigeração.

Figura 7 – Tanque de combustível.

Figura 8 – Sistema de refrigeração.

18.5 Resultados: Principais Testes

Foram realizadas avaliações preliminares da qualidade e do atendimento às especificações na fase de recebimento dos principais componentes e equipamentos comprados para uso no conjunto motogerador. Dentre essas avaliações mais completas, o motor foi submetido a um ciclo de ensaios para verificação de seu desempenho em termos operacionais, de potência, de torque e consumo [5].

A. Testes do Motor em Bancada Dinanométrica

O motor, na configuração exigida para aplicação no conjunto motogerador, não é um produto encontrado à venda no mercado, e, portanto, não passível de compra integrada. Por esta razão, não houve alternativa senão a da elaboração das especificações e de processar a compra das diversas partes componentes em processos separados.

Após a montagem o motor foi levado para o Laboratório de Ensaios de Motores e instalado em um banco de provas, denominado é bancada dinanométrica, onde foi testado por cerca de 50 horas, em condições controladas. Foram vários objetivos básicos desses testes iniciais com o motor:

- Avaliada a funcionalidade da montagem efetuada;
- Amaciamento inicial;

- Levantamento da curva de potência;
- Levantamento dos valores básico de consumo de combustíveis.

Nos gráficos abaixo são apresentados os resultados básicos de torque e de potência para o motor (VW AT1000), obtidos nos ensaios em bancada dinanométrica, trabalhando na rotação de 3600 rpm.

Os resultados mostram que o motor apresenta bom desempenho em termos de torque e potência na rotação de 3600 rpm, indicando ser adequado para trabalhos nessa rotação, e que, nessas condições, é perfeitamente possível utilizá-lo para geração de 30 kVA, atendendo as especificações previstas para o conjunto motogerador.

Figura 9 – Curva de torque.

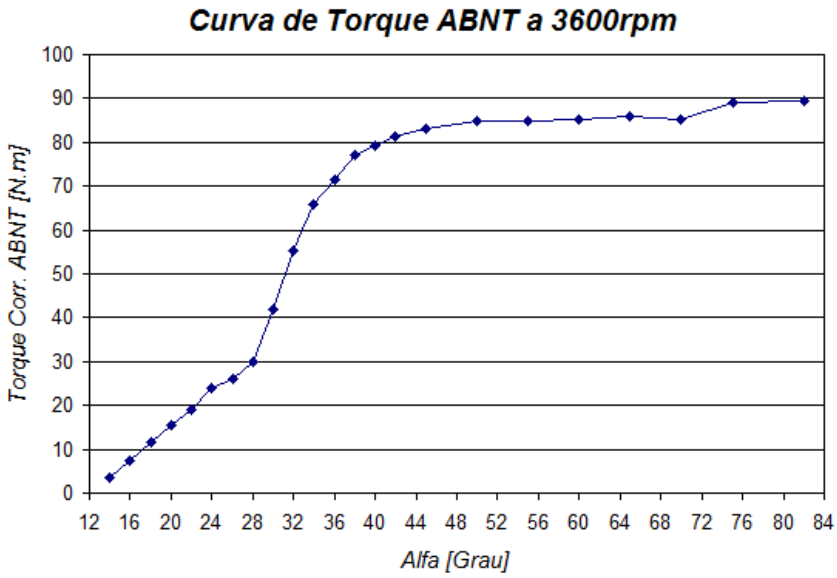
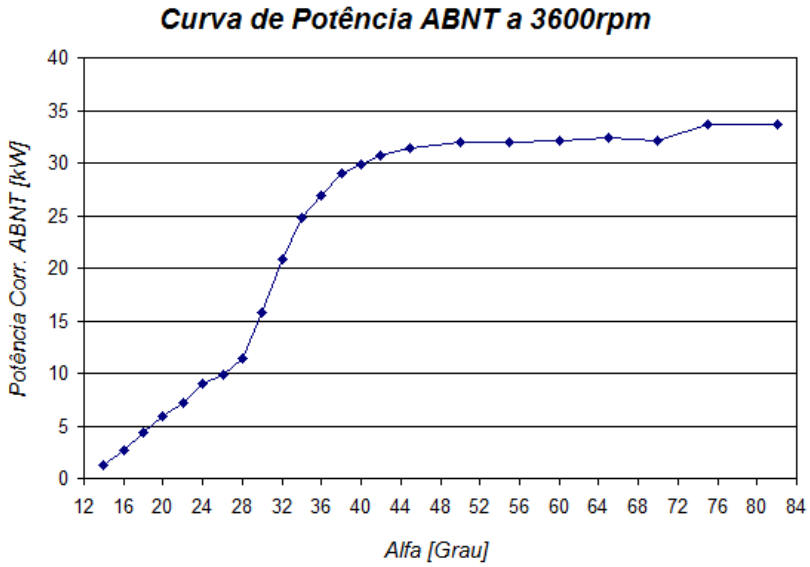
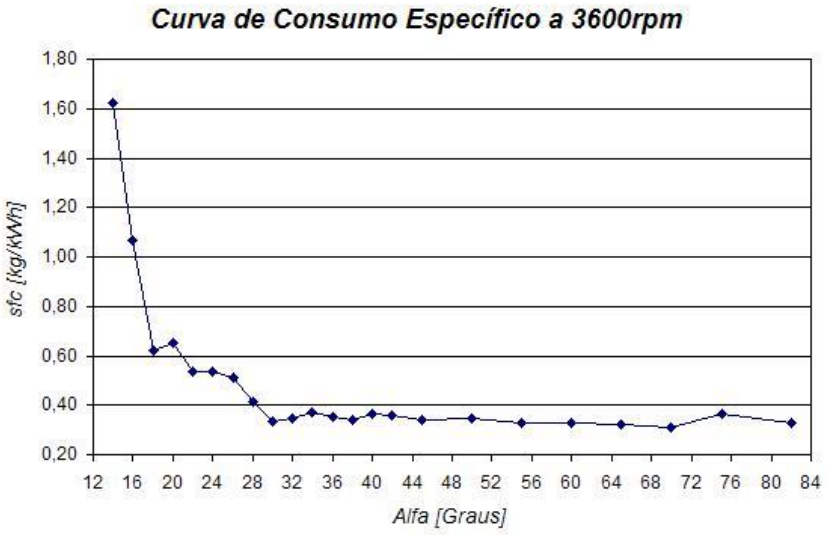


Figura 10 – Curva de potência.



Em termos de consumo específico, os dados indicam consumo em torno de 0,3 kg de álcool por kWh. Esse resultado, embora ainda de caráter preliminar por ter sido medido em ensaio de curta duração, é uma boa representação do que se pode esperar para o desempenho do grupo motogerador.

Figura 11 – Curva de Consumo específico.



B. Testes do Motogerador com Carga Simulada

Após a colocação do conjunto motogerador em condições operacionais, foram realizados diversos tipos de testes. Alguns foram feitos com objetivos de ajustes de partes funcionais, como os realizados para ajustes do sistema de partida e de desempenho inicial de outros componentes. Terminados esses ajustes iniciais, foram feitas diversas operações com carga, onde foi comprovada por acionamento manual do controle de aceleração, a capacidade de geração a 1/2, 1/3, e 3/4 da carga nominal específica.

Essa batelada de testes não foi realizada devido a um problema operacional inesperado, decorrente do precário funcionamento dos equipamentos e mecanismos instalados para executar o controle automático de rotação do motogerador. Esse controle é de vital importância para manter estável a frequência de 60 Hz da energia gerada, mesmo em situações de alteração da carga na faixa de potência especificada.

18.6 Avaliação do Sistema de Controle de Rotação

O sistema de rotação do motor projetado, especificado e comprado para uso nessa função, é formado por três dispositivos básicos, a saber:

- Pick-up para detecção de pulsos gerados pelo eixo motor-gerador;
- Controlador digital Woodward;
- Atuador Woodward.

Em termos operacionais, o sinal de rotação do eixo do motor-gerador é detectado pelo sensor "pick-up" existente no volante de acoplamento do motor e transmitido ao Controlador digital que compra o valor (VP) com o valor desejado (SP), gerando um sinal de correção em corrente (I), que é aplicado ao atuador para correção da rotação.

As observações funcionais sugerem que o ponto crítico do mau funcionamento reside no mecanismo atuador da aceleração, que opera como uma força magnética aplicada sobre um êmbolo ferrítico do atuador, pela passagem de corrente elétrica na bobina solenóide que envolve o êmbolo.

Há diversas causas que podem gerar esse mau funcionamento. O defeito pode estar no ajuste incorreto dos parâmetros PID de controle, embora exaustivas tentativas tenham sido feitas para acertar esses parâmetros, sem o necessário sucesso; pode estar no uso de um atuador incorreto para a aplicação; pode estar na variação das forças de atrito nos dispositivos do acelerado, ou até, uma combinação dessas potenciais fontes de falha.

18.7 Discussão

Os resultados obtidos em testes executados aplicando aceleração manual mostram que o motor automotivo de 1000 cm³ utilizado, do tipo convencional que equipa

carros populares, é adequado para uso em conjunto motogeradores de até 30 kVA, que, pelas avaliações realizadas, tem potência suficiente para suprir a energia elétrica demandada por fazendas de médio porte ou comunidades com até 10 casas.

Os dados preliminares foram obtidos para o consumo de álcool pelo motor, operando em regime médio de 60 % de carga, ou seja, 18 kW. Porém, como esses ensaios foram de curta duração, esses dados ainda são insuficientes para permitir um cálculo mais confiável do custo médio do kWh gerado. Mesmo porque, para se ter uma avaliação mais confiável, é preciso considerar não só o valor do álcool consumido, mas também os demais custos com a manutenção do conjunto motogerador e custos de pessoal envolvidos na operação. Até onde os testes iniciais foram realizados, essas estimativas ainda não podem ser feitas por falta de dados operacionais de longa duração.

No que diz respeito às modificações que necessitam serem feitas para operacionalizar o controle de rotação do motogerador, tudo indica que é necessário utilizar atuador mais robusto de atuar sobre o acelerador do motor. A partir da resolução desse problema, serão executados testes operacionais, visando gerar dados mais significativos sobre o desempenho do motogerador em ciclos de longa duração. Com os resultados desses testes será possível responder questões importantes, como as do custo do kWh gerado, comparado com preços cobrados pelas concessionárias de energia elétrica no país, e outros dados relativos aos problemas de manutenção e dificuldades operacionais.

18.8 Conclusões

A CEMIG D SA pôde com este projeto: avaliar oportunidades de negócios; subsidiar ações estratégicas; capacitar técnicos para trabalhos associados com o uso de álcool para geração de energia elétrica. O CETEC, que por sua vez teve o fortalecimento em pesquisa reforçando o reconhecimento como um importante centro de referência em combustíveis em Minas Gerais.

O desenvolvimento desse projeto envolveu técnicos com formação em diferentes áreas do conhecimento – mecânica, elétrica, eletrônica e gerencial. Essa diversidade de competências foi muito importante, visto que a ação teve requisitos em todas essas áreas.

As dificuldades associadas ao desenvolvimento deste projeto estiveram relacionadas com questões administrativas, fornecedores e técnica, mas que foram devidamente tratadas levando a conclusão do projeto tendo atingidos os objetivos propostos.

O motogerador construído no âmbito desse projeto se encontra no Laboratório de Ensaios de Motores do CETEC.

Capítulo 19

Capítulo 19: Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling[19]

***Resumo*- O motor Stirling é uma das tecnologias de geração distribuída com maior possibilidade de crescimento em regiões isoladas e podem operar com qualquer fonte de calor, incluindo a queima direta ou gaseificação da biomassa. Sendo a biomassa uma fonte de energia limpa e abundante, e pensando nos aspectos ambientais, essa tecnologia se faz muito promissora no âmbito de pesquisa em alternativas energéticas. Este artigo apresenta a pesquisa e desenvolvimento da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) junto com a Universidade Federal de Itajubá (NEST/UNIFEI) ocorrida dentro do projeto de P&D Cemig/Aneel 123 (Código Aneel 0049-069/2004) - Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling. Os resultados demonstram os avanços e as dificuldades no desenvolvimento do motor Stirling com tecnologia nacional.**

19.1 Introdução

Os crescentes danos ambientais associados aos processos de extração, processamento, transporte e utilização de combustíveis tradicionais tem levado a uma busca de alternativas energéticas renováveis que mitiguem esses danos e garantam o fornecimento de energia [1]. O motor Stirling é umas das tecnologias de geração distribuída com maior possibilidade de crescimento em regiões tropicais (elevada incidência de radiação solar e alta produtividade de biomassa) em curto prazo, devido à possibilidade de utilização de qualquer fonte de calor para seu funcionamento.

Se comparados com outras energias alternativas comumente usadas em áreas isoladas (solar e eólica, motores de combustão interna) e outras tecnologias promissoras (micro turbinas a gás e células combustíveis), os motores Stirling que usam biomassa ainda são mais atraentes, pois apresentam custos competitivos, oferecem serviços contínuos e estáveis, não precisa de outra fonte geradora auxiliar e eliminam os altos custos associados ao consumo e transporte de combustíveis fósseis.

A utilização da biomassa é uma alternativa viável, ambientalmente correta e importante para o atendimento, a um menor custo, do crescimento da demanda energética da sociedade, para a geração de emprego e renda de forma descentralizada. A diversificação da matriz energética, com inserção da biomassa é uma tendência mundial e poderá ocorrer de forma acelerada no Brasil se houver um planejamento integrado de governo, de forma a viabilizar o uso desse energético com ênfase no desenvolvimento industrial e regional.

[19] SILVA, E. L. B. ; SILVA, C. H. F. ; LOPES, B. M. Publicado em VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2011, Fortaleza.

Este artigo apresenta os desenvolvimentos realizados pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 123 (Código Aneel 0049-069/2004) – Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling. Na seção 19.2 é apresentado o projeto. A seção 19.3 indica o desenvolvimento e os principais resultados desta pesquisa. Na seção 19.4 são apresentadas as conclusões. E encerrando o livro, encontram-se as referências utilizadas para a elaboração deste trabalho.

19.2P&D CEMIG/ANEEL 123

O P&D Cemig/Aneel 001, criado em 2000, foi um projeto bastante arrojado e ambicioso, cujo título: Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração de Eletricidade exprime a grande amplitude de seus objetivos. Neste projeto foram adquiridos, montados e testados alguns motores Stirling e testados com diversos combustíveis.

Houve durante a pesquisa modificações na câmara de combustão, no sistema de alimentação da biomassa, testes de estanqueidade, adição ao sistema de pré-aquecedor. Esse estudo teve como desdobramento um novo projeto de pesquisa (P&D Cemig/Aneel 123 (Código Aneel 0049-069/2004)) cujos propósitos foram [1]:

- Desenvolver protótipos nacionalizados de motores Stirling, com sistema de combustão de biomassa associado;
- Projetar, construir e testar uma fornalha compacta para a queima de biomassa para o acionamento de motores Stirling;
- Disseminar e contribuir para o desenvolvimento da geração distribuída.

O P&D CEMIG/ANEEL 123 (Código Aneel 0049-069/2004) se iniciou no ciclo 2003/2004 e foi encerrado em Outubro/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Distribuição SA e o Núcleo de Excelência em Sistemas Térmicos (NEST/UNIFEI). O projeto propõe o desenvolvimento, teste e construção de um protótipo de motor Stirling adaptado para as condições de operação isolada. Indiretamente este projeto possui reflexos na realidade industrial na forma de fomento e incentivo a aquisição e fornecimento de peças nacionais, promovendo a abertura de novos horizontes para a indústria brasileira. Desta maneira o projeto engloba o ciclo completo de desenvolvimento do produto, desde o seu projeto, até a sua fabricação, tendo assim um caráter especialmente inovador e atrativo do ponto de vista tecnológico e industrial [2]. A Figura 1 mostra o Motor Stirling Solo de 9 kW e de 500 W montados nos laboratórios do NEST.

Figura 1 – Motores Stirling: 9 kW (a) e 500 W (b) montados no NEST.

(a)

(b)

19.3 Resultados Obtidos

O pastor escocês Robert Stirling em 1816, auxiliado pelo seu irmão engenheiro, aperfeiçoou um motor de combustão externa. Os irmãos Stirling buscaram conceber um mecanismo mais seguro que as caldeiras, que naquela época causava inúmeros acidentes, resultando em mutilações nos trabalhadores da indústria. É referido também como "motor de ar quente", por utilizar os gases atmosféricos como fluido de trabalho. Este tipo de motor funciona com um ciclo termodinâmico composto de 4 fases e executado em 2 tempos do pistão: compressão isotérmica,

aquecimento isocórico, expansão isotérmica e resfriamento isocórico. A Figura 2 mostra o diagrama pressão versus temperatura. Este é o ciclo idealizado, que diverge do ciclo real medido por instrumentos. Não obstante, encontra-se muito próximo do chamado Ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas.

O motor Stirling apresenta diversas vantagens: é pouco poluente pois a combustão é contínua, e não intermitente como nos motores Ciclo de Otto e Ciclo Diesel, permitindo uma queima mais completa e eficiente do combustível. Por isso é muito silencioso e apresenta baixa vibração, uma vez que não há explosão. É verdadeiramente multi-combustível, pode utilizar praticamente qualquer fonte energética: gasolina, etanol, metanol, gás natural, oléo diesel, biogás, GLP, energia solar, calor geotérmico e outros. Basta gerar uma diferença de temperatura significativa entre a câmara quente e a câmara fria para produzir trabalho. A eficiência neste caso, conforme indica a termodinâmica será maior quanto maior for a temperatura. A Figura 3 mostra um esquema de funcionamento deste motor.

Figura 2 – Ciclo termodinâmico para o motor Stirling [3].

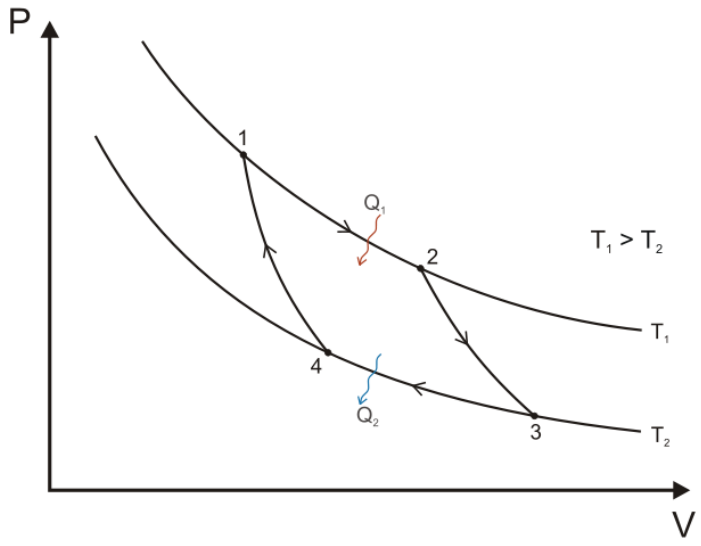
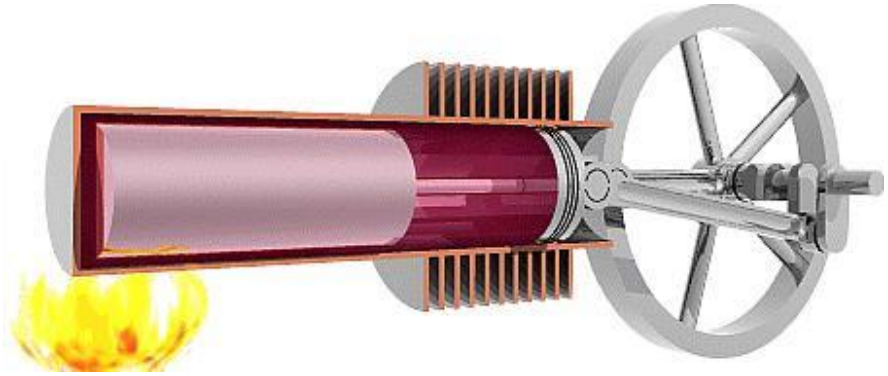


Figura 3 – Motor Stirling: esquema de funcionamento [3].



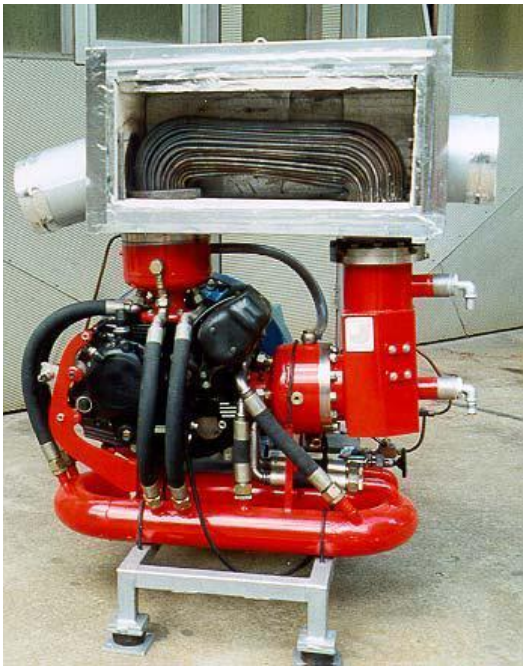
Há 3 configurações básicas de motor Stirling: Alfa - com cilindros em V; Beta - com êmbolos coaxiais num mesmo cilindro; Gama - com cilindros em linha.

Algumas atividades necessárias para se atingir os objetivos do projeto são descritas a seguir [4]:

- A modelagem do sistema, visando a definição das características do novo motor;
- Desenvolvimento, fabricação e testes de avaliação de três protótipos de 9 kW com sistema de combustão de biomassa associado;
- Projetar, construir e testar uma fornalha compacta para queima de biomassa;
- Avaliar a operação isolada, a viabilidade técnico-econômica e possibilidade de fabricação nacional.

Foram realizadas visitas a alguns fabricantes de motores Stirling na Dinamarca e na Áustria. Na Áustria existe um motor Stilring já adaptado para funcionamento com biomassa, na forma de pellets, desenvolvido pelo Joanneum Research. Este motor, pela simplicidade de adaptação, foi escolhido como modelo para o desenvolvimento do protótipo nacional através do P&D 123 (Código Aneel 0049-069/2004). Após diversos contatos, o pesquisador do Joanneum Research, Dr. Erich Podesser, passou a participar do projeto em uma colaboração bilateral. A Figura 4 mostra o motor austríaco, modelo para os desenvolvimentos do projeto e dos protótipo.

Figura 4 – Motor Stirling.



A metodologia adotada para execução deste projeto pode ser resumida nas etapas mostradas a seguir [2]:

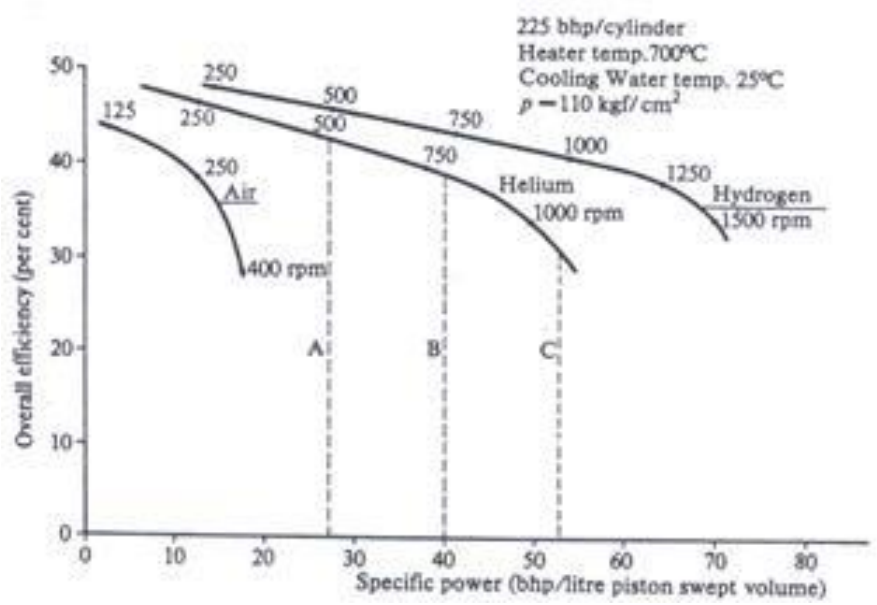
- Estudo para definição do fluido de trabalho de gás hélio, ar ou nitrogênio, considerando a facilidade de obtenção e custo do fluido de trabalho;
- Redução da pressão de operação, até limites que garantiriam a segurança de operação;
- Desenvolvimento de um sistema de controle de frequência e carga que permitisse a operação de forma independente da rede;
- Redução da resistência hidráulica no sistema de resfriamento até valores compatíveis com a carga fornecida pelo sistema de fornecimento de água acionado com vapor da fornalha, através de um ejetor de vapor.

De todos os motores estudados definiu-se pelo motor Alfa em relação às outras configurações. Por este critério foi selecionado um mecanismo de motor alternativo com dos pistões defasados a 90°. Este mecanismo corresponde a uma motocicleta Cagiva. Vários fluidos de trabalho podem ser utilizados em motores Stirling. Na Figura 5 apresenta uma comparação numérica dos diferentes fluídos de trabalho.

Esta figura resume um estudo extensivo utilizando métodos de otimização. Os resultados são referentes a um motor Stirling de 165 kW por cilindro, temperatura

do trocador de calor de aquecimento de 700°C, temperatura do trocador de calor de resfriamento de 25°C e uma pressão máxima do gás de trabalho de 110kgf/cm2. A eficiência total do motor é função da potência de saída por unidade de deslocamento. O tamanho do motor diminui para o lado direito da curva. As três curvas correspondem aos três diferentes gases de trabalho, gerando a mesma potencia em qualquer ponto com a máxima eficiência possível.

Figura 5 – Desempenho do motor Stirling com diferentes fluídos de trabalho [5].



Isto sugere que em baixas potências, e baixas rotações, não há vantagens substanciais na substituição do ar por Helio ou hidrogênio.

O fluido de trabalho adotado para este protótipo foi o nitrogênio, devido às vantagens citadas abaixo:

- Barato e disponível;
- Alguns pequenos vazamentos são toleráveis e os selos são mais baratos;
- Podem-se compensar os vazamentos com um compressor auxiliar.

Nas Figuras 6-7 é apresentada a simulação para a potência do motor em função do ângulo de defasagem. A Figura 8 mostra a potência produzida pelo motor Stirling em função do volume de deslocamento a diferentes pressões de operação. Pode-se observar que existe um ponto ótimo que relaciona o volume do pistão quente e o volume de fluido de trabalho deslocado. Pode-se dizer que a relação ótima entre os volumes é aproximadamente 2, mas, considerando as perdas por fricção no trocador de calor e no regenerador, este valor deve aumentar [6].

A Figura 9 mostra a influencia da temperatura sobre a potência produzida para diferentes pressões de operação. A importância de uma boa seleção dos parâmetros de operação como temperatura e pressão e do cálculo apurado dos volumes do motor possui reflexos construtivos e de desempenho do motor [7].

A Figura 10 mostra como o conjunto motor Stirling/Gerador pode ser integrado no sistema de combustão de biomassa. Também é importante definir como a biomassa vai ser fornecida no sistema, seja madeira ou algum outro tipo de resíduo. Este sistema pode ser automático, manual ou ambos.

Figura 6 – Potência em função do angulo de defasagem entre os pistões quente e frio [6].

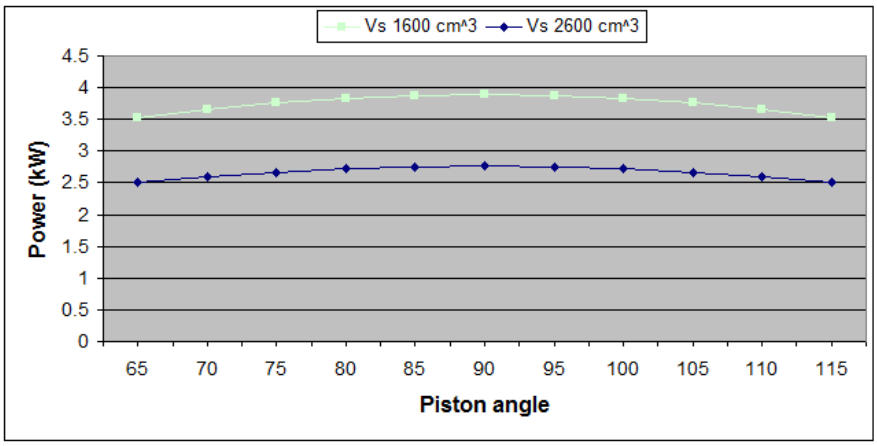


Figura 7 – Potencia em função de diferentes volumes de deslocamento para diferentes pressões de operação [6].

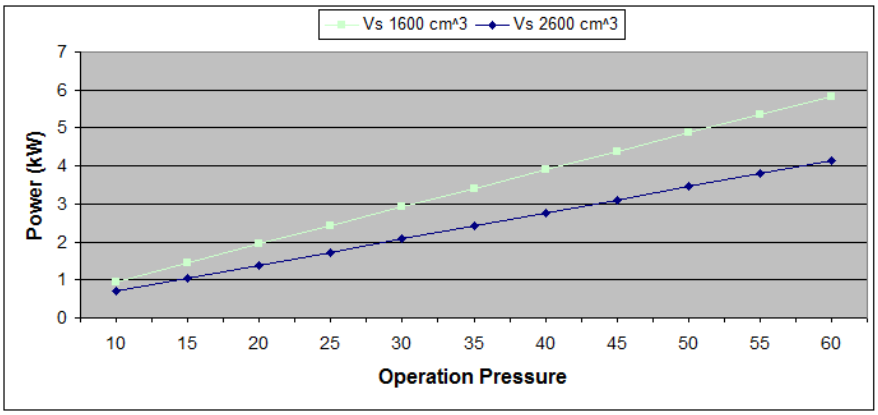


Figura 8 – Potência em função do volume deslocado [6].

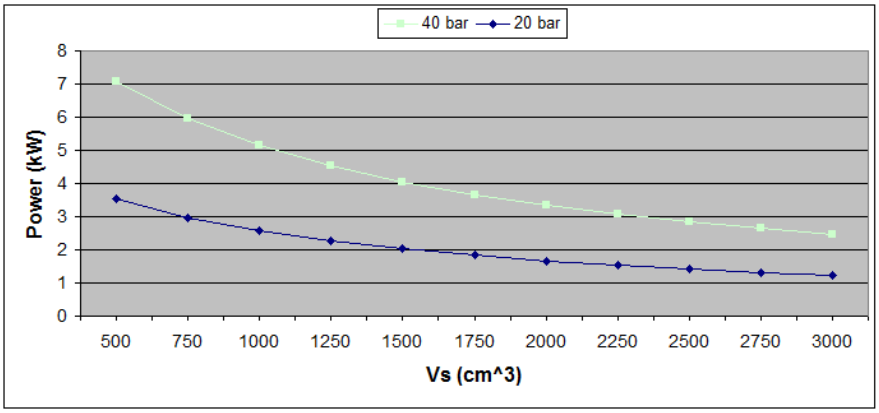
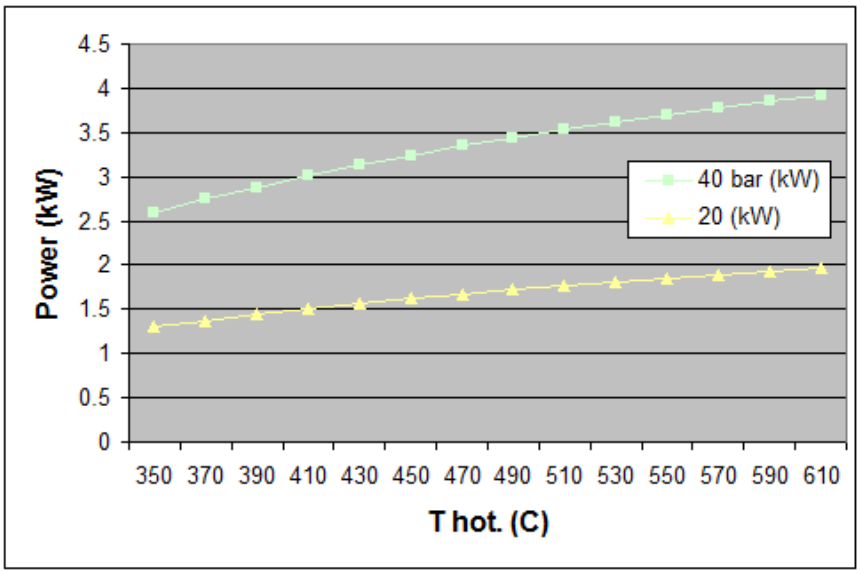


Figura 9 – Relação entre a potência produzida e a temperatura de operação [6].



O ar do ambiente deve passar primeiramente por um trocador de calor onde será pré-aquecido entre 300 a 600 °C. Este ar pré-aquecido é fornecido posteriormente na câmara de combustão onde se pode ter dois estágios de combustão: primário e secundário. A temperatura final do gás depende da porcentagem de oxigênio envolvida no processo de combustão e da umidade da biomassa utilizada. O gás de combustão sai da câmara de combustão com uma temperatura entre 800 a 1200° C e entra em contato com o aquecedor do motor Stirling.

No ponto de projeto o gás quente entra em contato com o trocador de calor quente a 1000 °C e deixa este, aproximadamente, a 750 °C. A chaminé depois do trocador de calor para preaquecimento do ar.

O diagrama de Sankey da Figura 11 mostra os fluxos de energia envolvidos no processo de acoplamento do motor Stirling à fornalha. Através deste diagrama se pode observar a importância do processo de recuperação da temperatura dos gases de exaustão no pré-aquecimento do ar [9].

Figura 10 – Integração do motor Stirling numa fornalha para biomassa [8].

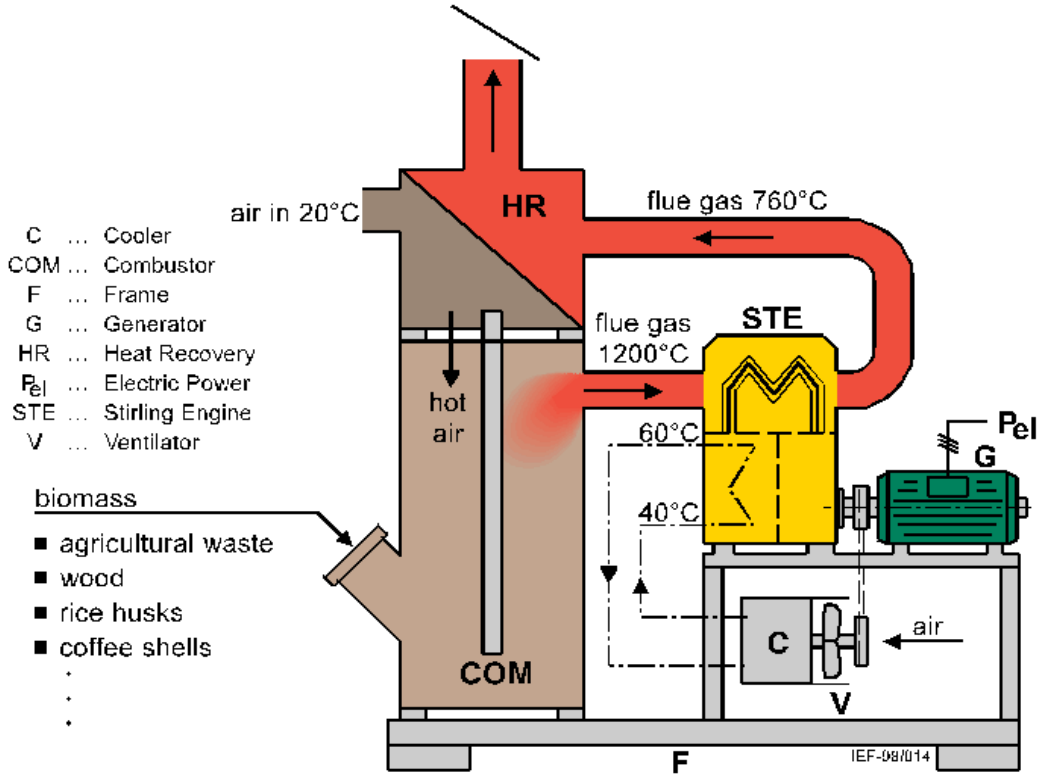
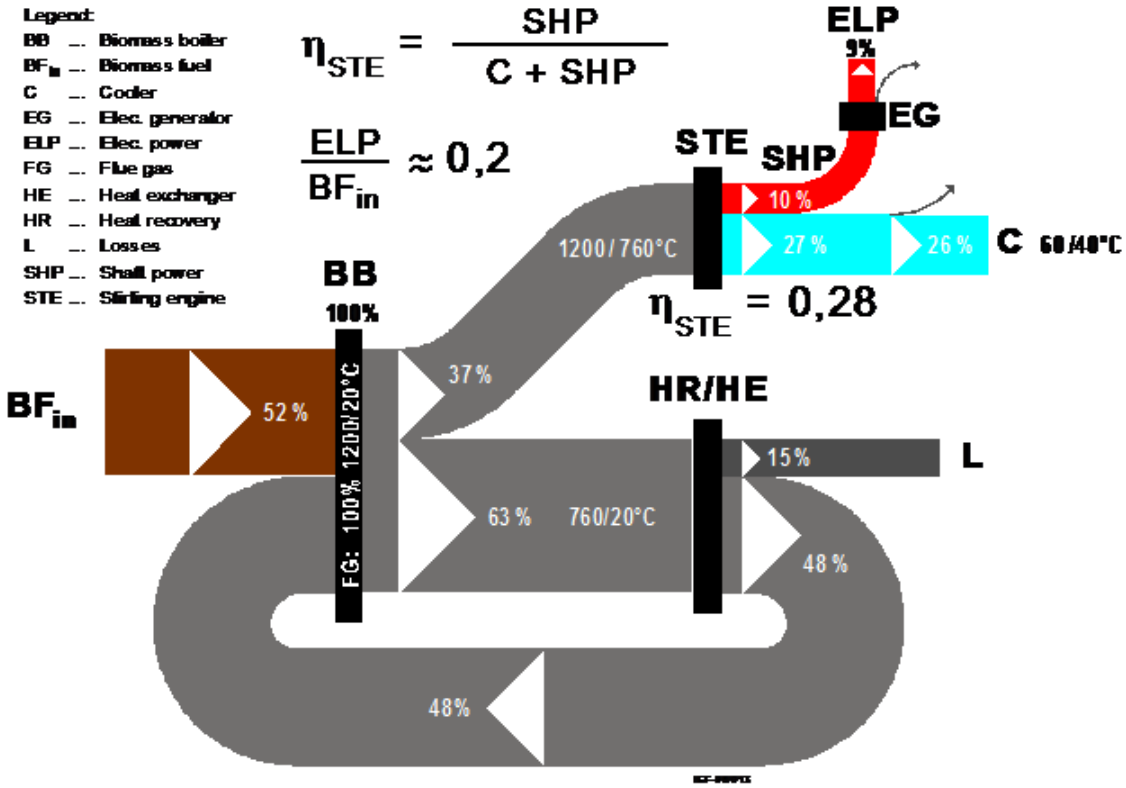


Figura 11 – Diagrama de Sankey do acoplamento da fornalha a biomassa acoplada ao sistema Motor Stirling/Gerador elétrico [9].



Apenas 37% da energia térmica é fornecida ao aquecedor do motor Stirling e, resultante da troca térmica. Os 63% restantes do conteúdo energético inicial no gás de combustão entra no trocador de calor onde aquece o ar de combustão. Neste pré-aquecedor se recupera 48 % do calor deste gás, transferindo este ao ar, o qual se aquece até, aproximadamente, 580 °C. Depois do pré-aquecedor o gás de exaustão se esfria até 176 °C e é liberado ao ambiente. A recuperação dos 48% leva a uma redução de 48% no fornecimento de biomassa. Desta maneira, 100 % da capacidade térmica do gás produzido é fornecida com 52 % de biomassa e os outros 48 % pelo sistema de recuperação. Consequentemente, a relação entre a potência de eixo entregue pelo Stirling é aumentada de 10 para aproximadamente 20 %.

O sistema motor Stirling acoplado à fornalha de biomassa foi testado de forma preliminar encontrando-se algumas dificuldades ao longo dos testes. A Figura 12 mostra o sistema acoplado para os testes preliminares.

Figura 12 – Fornalha Motor Stirling acoplados.

Uma das decisões tomadas para estes testes foi a não utilização de um ventilador para forçar o fluxo do gás produto da combustão. Foi utilizado um sistema de ejetor que garante uma tiragem intermediaria do fluxo de gases quentes, permitindo avaliar o sistema do ponto de vista mecânico é não energético. Ou seja, a potência obtida é menor, assim como a velocidade do motor.

A avaliação do motor deste ponto de vista é importante porque permite detectar outros problemas que poderiam afetar o motor mais severamente, no caso de este se encontrar operando com um fluxo de gases quentes maior, e uma maior velocidade, o que seria garantido pela tiragem com um ventilador forçado. O principal

problema encontrado foi à danificação do sistema de transmissão de movimento (pistão haste) entre o virabrequim e o pistão quente do Stirling. O que levou ao teste de diferentes alternativas para este sistema.

Outro problema ocorrido na fase de teste foi a quebra da haste de ligação entre o pistão do motor Stirling e o pistão Ducatti. A causa deste problema foi o ajuste adotado entre o pistão quente e o topo do cilindro quente do Stirling. Após alguns minutos de operação com temperaturas da ordem de 950°C no topo houve a dilatação da parte superior do pistão e o topo do cilindro entrando em contato entre ambos. Isto provocou a quebra da haste de transmissão e o do pistão Ducatti que é fabricado de alumínio. Após este problema decidiu-se fabricar uma peça mais robusta para substituir o pistão Ducatti danificado. Foi testado o sistema novamente, e detectado que a peça projetada apresentava uma fricção acentuada na descida do pistão quente, fato devido a pouca área de apoio desta peça no cilindro e a distancia considerável entre os anéis guias da peça.

O motor Stirling pode operar no ciclo inverso como um compressor, resultando em uma máquina de frio, podendo-se obter temperaturas muito baixas dependendo da pressão de operação. Por outro lado, o aumento da pressão de trabalho requer de um acionador potente, mas como a intenção do teste foi só verificar a operação do motor, foram obtidas temperaturas de -10°C com uma pressão de nitrogênio de 1177 kPa a apenas 10 minutos de operação. A Figura 13 apresenta o congelamento no pistão durante esta operação.

Fig. 13 – Motor Stirling operando em ciclo inverso.

Após os testes de operação com o motor Stirling em ciclo inverso foi constatada a necessidade de compatibilidade entre os materiais do pistão e do cilindro Ducatti.

Isto se deve à fricção entre aluminho (material do cilindro Ducatti) e aço (material do pistão fabricado) ser muito elevada, levando à danificação do metal do cilindro.

Dos testes realizados obtiveram alguns resultados preliminares os quais são mostrados na Tabela 1. A Figura 14 apresenta o sistema operando, pode-se observar a cor da cobertura do trocador de calor quente submetido às elevadas temperaturas de operação. A Figura 15 apresenta a montagem do motor para o teste.

Foram realizadas medições com duas pressões de fornecimento de nitrogênio para valores similares de temperatura na entrada do trocador de calor quente. É importante assinalar que o consumo de biomassa relativamente elevado se deve às ausências do sistema de pré-aquecimento do ar da fornalha e do sistema de tiro forçado com ventilador.

Fig. 14 – Sistema operando a 900°C de temperatura na entrada do trocador de calor quente.

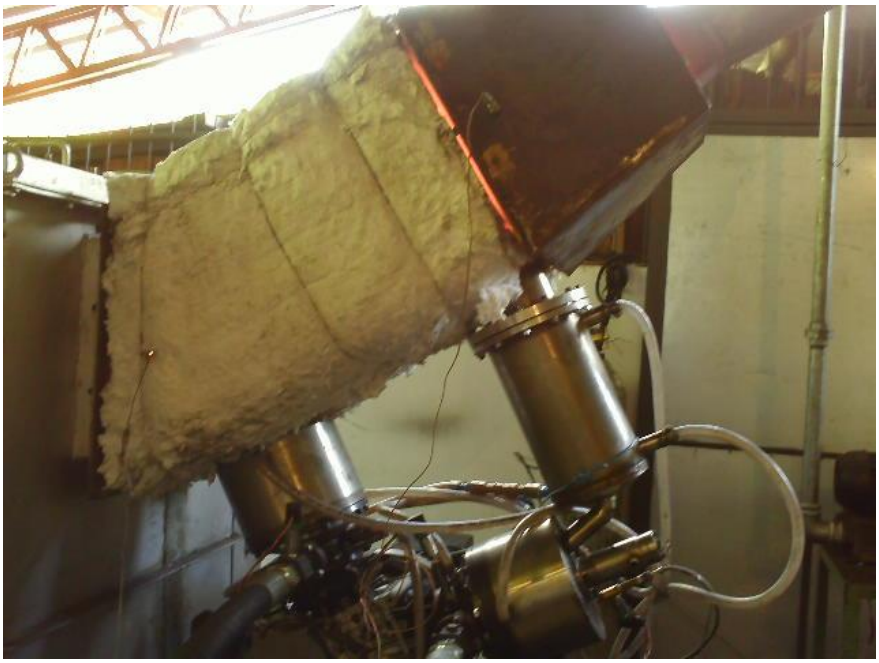


Fig. 15 – Motor Stirling em teste.

Tabela I – Principais valores obtidos no teste do Motor Stirling operando com Biomassa [10].

Parâmetro		
Gás de trabalho	Nitrogênio	
Pressão fornecida	1470 kPa	2451 kPa
Pressão máxima no topo do pistão de compressão	1765 kPa	2843 kPa
Pressão máxima na parte inferior do pistão quente	1667 kPa	2549 kPa
Velocidade de operação	300 rpm	300 rpm
Potencia elétrica gerada	0,7 kW	0,9 kW
Temperatura ambiente	32ºC	32ºC
Temperatura na entrada do trocador frio	22°C	22°C
Temperatura na saída do trocador frio	50°C	52°C
Temperatura na entrada do trocador de calor quente	900ºC	890ºC
Temperatura na saída do trocador quente	750ºC	760°C
Consumo de biomassa	70 kg/h	70 kg/h

Alguns problemas apresentados durante a realização do projeto:

- Baixa velocidade de operação do motor: A velocidade de rotação nominal esperada deve ser 600 rpm mas, só conseguiu 300 rpm. A potência do motor de-

pende da velocidade de rotação ótima; baixas velocidades representam baixas potencias e eficiência. Esta baixa rotação pode ser provocada por várias razões, como por exemplo: transferência de calor insuficiente no trocador quente do motor; volume morto excessivo; perdas mecânicas e por fricção do fluido de trabalho no interior do motor. A primeira instalação do sistema foi feita assumindo que uma chaminé de aproximadamente 10 m de altura seria suficiente para garantir a velocidade dos gases quentes através do trocador de calor quente. A velocidade dos gases se da pela diferença de densidade dos gases de combustão na chaminé e o ar ambiente à pressão atmosférica. Para aumentar esta velocidade foi colocado um ejetor. Na prática constatou-se que a velocidade dos gases obtida não foi suficiente, mantendo o motor a baixa velocidade. Como os gases quentes saem a temperaturas acima de 500°C é inviável medir o fluxo destes com um medidor de vazão convencional. Para resolver este problema foi instalando um ventilador de tiro forçado para os gases, como é feito em caldeiras convencionais que, se servem deste mecanismo para vencer as perdas de carga através dos tubos dos trocadores de calor. Aproveitando a tiragem forçada foi instalado também um sistema de pré-aquecimento do ar de combustão. Antes de passar pelo ventilador de tiro forçado, os gases de combustão são esfriados num trocador de calor de pré-aquecimento do ar, desta forma a eficiência da fornalha pode ser aumentada consideravelmente. Depois de testado este sistema observou-se que o problema da baixa rotação continua. Conclui-se que o problema da transferência de calor insuficiente não é produto da baixa velocidade dos gases quentes no exterior do trocador quente e sim um problema interno do motor.

- Problema com relação às forças aplicadas na peça de transmissão de movimento. Neste primeiro protótipo, por questão de custos, decidiu-se usar um bloco de motocicleta como mecanismo de transmissão de movimento e, na cabeça do pistão da moto, é acoplado o pistão do motor Stirling. Ao selecionar este mecanismo só foram consideradas as forças pelo efeito da expansão no pistão do Stirling (força na direção descendente), que são menores que as forças às que está submetido o pistão da moto selecionada quando operando como motor convencional. Na realidade, existe outra força produto à mudança de movimento alternativo (sobe e desce), do pistão Stirling acoplado sobre o pistão da moto. Esta outra força faz com que os parafusos (de aço) que fixam o pistão do Stirling na cabeça do pistão da moto (de aluminho) fadiguem a este ultimo provocando ruptura num período curto de operação. Foi projetada e fabricada uma nova peça de transmissão de movimento em aço a qual é muito mais resistente. Esta peça é fabricada em aço e a superfície da haste foi cromada para garantir o mínimo desgaste possível ao friccionar com o selo que trabalha sobre esta;

- Incompatibilidade de materiais usados no projeto. Desgaste das superfícies submetidas à fricção com o material dos selos. Após poucas horas de operação notou-se o aparecimento de um pó preto no interior do motor devido à fricção do aço inox com o material do selo. Este problema foi resolvido trocando o aço

da haste por um aço mais duro, e consequentemente mais barato e colocando uma camada de cromo na sua superfície. Na região da haste do *crosshead* a temperatura é menor que 250°C pelo que não é necessário um aço altamente resistente à temperatura e esta região é lubrificada. No caso dos cilindros do Motor Stirling, onde a temperatura é maior, foi aplicada uma camada de cromo duro a qual deve ser suficiente.

A Figura 16 mostra as peças fabricadas para os outros dois protótipos previstos para a construção neste projeto. Estas peças não sofrem interferência dos problemas citados, compondo outras partes necessárias do sistema.

Fig. 16 – Peças para mais dois protótipos do motor Stirling.

19.4 Conclusões

Este projeto possibilitou a capacitação de mão-de-obra, pelo envolvimento de pesquisadores nacionais e internacionais, bolsistas e professores. Houve o fortalecimento do centro de excelência em sistemas térmicos (NEST/UNIFEI) pelo mapeamento da tecnologia motor Stirling. Para a Cemig D os resultados deste projeto forneceram subsídios de forma a identificar oportunidade no aproveitamento energético da biomassa, no uso de sistemas de energia com motores Stirling e no encaminhamento de ações e políticas associadas à geração distribuída. Indiretamente, os resultados do trabalho de pesquisa do P&D Cemig Aneel nº 123 (Código Aneel 0049-069/2004) promovem o fomento para a indústria nacional, na medida em que cria condições técnicas para nacionalização e desenvolvimento deste tipo de motor.

A utilização da biomassa é alternativa viável correta e importante para o atendimento, a um menor custo, do crescimento da demanda energética da sociedade, para geração de emprego e renda de forma descentralizada. Um protótipo nacional de motor Striling tipo alfa de 9 kW acoplando à fornalha de biomassa de 50 kW encontra-se em fase final de testes e ajustes, estando em funcionamento nos laboratórios do NEST. Outros dois protótipos estão sendo desenvolvidos, já considerando a incorporação das melhorias ocorridas no primeiro protótipo. O desenvolvimento de um bloco de motor nacional, sem caixa de marchas, em substituição ao

bloco do motor Ducatti também está sendo estudado, para dar maior rigidez e simplicidade ao motor Stirling nacional.

Os estudos sofreram as dificuldades, em certa medida inerentes aos processos reais e experimentais. Tais problemas encontram-se principalmente relacionados a materiais construtivos levando-se em consideração a exigência das condições de operação.

Os resultados obtidos neste projeto encontram-se arquivados na Gerencia de Alternativa Energética da Cemig e o teor dos documentos reforça a convicção de que se trata de uma tecnologia que contribuirá de forma relevante e significativa para a segurança energética e com menores impactos ambientais.

Capítulo 20

Capítulo 20: Sistema para Cálculo do Potencial de Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas e Termoelétricas Solares de Grande Porte[20]

***Resumo*- O atual cenário energético brasileiro aponta para um crescimento da oferta de energia elétrica baseado principalmente em fontes renováveis. Merece destaque neste contexto o aproveitamento da energia solar, que ocorre através do emprego de concentradores de radiação solar e painéis fotovoltaicos. Como primeiro passo rumo à popularização e implantação em larga escala do uso desta fonte, surgiu a necessidade de realizar um mapeamento da sua disponibilidade energética e o cálculo do potencial para instalações solares. Assim, este artigo relata o desenvolvimento parcial do projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (P&D) Cemig/Aneel nº GT 468. O principal produto parcial deste projeto obtido até o momento é o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Este produto parcial apresenta, além do mapeamento do potencial no Estado, as regiões com maior potencial para implantação de usinas solares.**

20.1 Introdução

Após a exploração de uma elevada parcela do potencial hídrico existente no estado de Minas Gerais através da construção de grandes usinas hidrelétricas, como alternativas energéticas restaram principalmente a construção de pequenas centrais hidrelétricas e o aproveitamento das demais fontes renováveis locais. Existe também a possibilidade de importação de energia de outras regiões ou mesmo a geração de origem nuclear, apesar dos conflitos ambientais e políticos a ela associados [1].

As principais possibilidades de suprimento adicional de energia a médio prazo são:

- a hidroeletricidade da Amazônia, com custo de transmissão que pode ser equivalente ao de geração e cujos impactos ambientais podem criar incertezas aos empreendimentos, transformando esta energia numa opção de custo e risco elevados;
- os combustíveis fósseis, que se apresentam com preços e incertezas de fornecimento crescentes, impactos ambientais significativos e subsídios "invisíveis" (externalidades), cada vez mais questionados pela sociedade.

[20] SILVA, C. H. F.; COSTA, J. C. E. ; ALMEIDA, N. F. ; PORTO, M. A. D. ; TIBA, C. ; REIS, R. J. . Publicado em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2013, Rio de Janeiro.

A busca por alternativas locais de produção de energia é, portanto, uma questão estratégica, sendo que as principais fontes renováveis que hoje se apresentam são a biomassa, o vento e a radiação solar [2], [3].

O Atlas Brasileiro de Energia Solar [4] faz estimativas da radiação solar a partir de imagens de satélites. Como resultado, foi identificada a região de valor máximo de radiação solar global, localizada ao norte da Bahia, próxima à fronteira com o Piauí (6,5 kWh/m²) e a região de valor mínimo, no litoral norte de Santa Catarina (4,25 kWh/m²). É importante ressaltar que todas as regiões do território brasileiro apresentam potenciais superiores aos da maioria dos países da União Europeia, onde os incentivos em energia solar são amplamente disseminados.

Conforme levantamento da Cemig de 1987, o estado de Minas Gerais apresenta níveis relativamente elevados de radiação solar. Variam em valores próximos aos encontrados nas regiões mais favoráveis do mundo (faixa de 5 a 7 kWh/m²/dia) [5]. Entretanto, é necessário que seja realizado um mapeamento mais específico e detalhado da área mineira, como desdobramento do atlas brasileiro de energia solar, principalmente considerando-se que nos últimos 20 anos a instrumentação e equipamentos analíticos evoluíram significativamente. Desta forma, pode-se assegurar a disponibilidade energética, possibilitando que sejam projetados sistemas mais aprimorados para o aproveitamento da energia solar.

Surgiu então o projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (P&D) Cemig/Aneel nº GT 468 (código Aneel: PD-4591-0468/2011). Este projeto resultou da parceria entre Cemig GT e Terra Verde e ainda se encontra em desenvolvimento, com término previsto para abril de 2014.

O principal objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de cálculo para determinar o potencial de aproveitamento energético da energia solar em usinas de grande porte. Entre os produtos deste projeto, encontra-se o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. A metodologia básica para o desenvolvimento desta pesquisa foi a experimentação (computacional), fundamentada no estado da arte da tecnologia e tendo em consideração as metas do projeto, que por sua vez encontram-se alinhadas com a visão estratégica da concessionária de energia.

Com o desenvolvimento da pesquisa, espera-se também consolidar uma expertise no cálculo de sistemas fotovoltaicos, composta por pesquisadores e especialistas em Minas Gerais, e também a instituição de um centro de excelência na área. O conjunto de informações que será constituído no projeto poderá ser disponibilizado para pesquisadores e estudantes de universidades mineiras e de outras regiões, assim como para profissionais que atuam neste campo, via meio magnético ou no site no projeto. Estudos acadêmicos, monografias, dissertações e teses baseadas nas informações reunidas no projeto, possibilitarão que seja melhorado o desempenho dos investimentos feitos por pessoas físicas e jurídicas na implantação de usinas solares fotovoltaicas e solares termoelétricas, ao empregar valores mais bem estimados através da metodologia proposta [1].

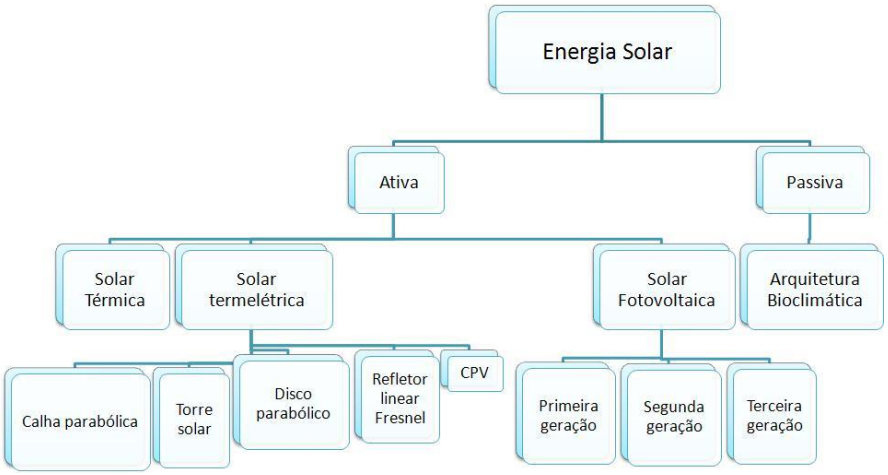
É importante reforçar a ideia de que para a concessionária de energia, um trabalho desta natureza é essencial na previsão e planejamento de novos negócios em energia solar.

20.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Energia Solar

O Sol é uma fornalha atômica que transforma massa em energia. A cada segundo, o Sol transforma 657 milhões de toneladas de hidrogênio em 653 milhões de toneladas de hélio. Os 4 milhões de toneladas de diferença são transformados em energia e descarregados no espaço na forma de radiação solar. A Terra recebe apenas 2 bilionésimos desta energia (energia eletromagnética) [6]. Na Figura 1 podem ser vistas as formas de aproveitamento de energia solar.

Figura 1 – Energia solar e as possibilidades de aproveitamento.



O modo mais fácil e comum de realizar o aproveitamento da energia solar é pelo aquecimento de água, usando coletores criados especialmente para converter a radiação do Sol em energia térmica. O estado de Minas Gerais possui um papel de destaque no cenário nacional quanto ao aproveitamento de energia solar térmica de baixa temperatura. Tal destaque é exposto no Balanço Energético do Estado de Minas Gerais em sua 26ª edição [7]. Estima-se em 30% a participação de Minas no mercado nacional de aquecedores solares. A Figura 2 apresenta a área nova instalada e a área acumulada de painéis solares instalados em Minas Gerais. Quanto à economia de energia, ou seja, a energia elétrica evitada, a área de coletores acumulada entre 1991 – 2010 totalizou uma economia de 10.013 GWh, que representa 861 mil tep.

Assim sendo, fica evidente a contribuição da energia solar, tanto da perspectiva energética, quanto da eficiência de processos, resultando em economia ambiental, econômica e social, consolidando a sustentabilidade do uso desta fonte.

Figura 2 – Evolução da área de coletores solares [7].

Para a produção de eletricidade, são utilizados concentradores de radiação solar e painéis fotovoltaicos, nos quais a energia eletromagnética é convertida em energia elétrica direta ou indiretamente.

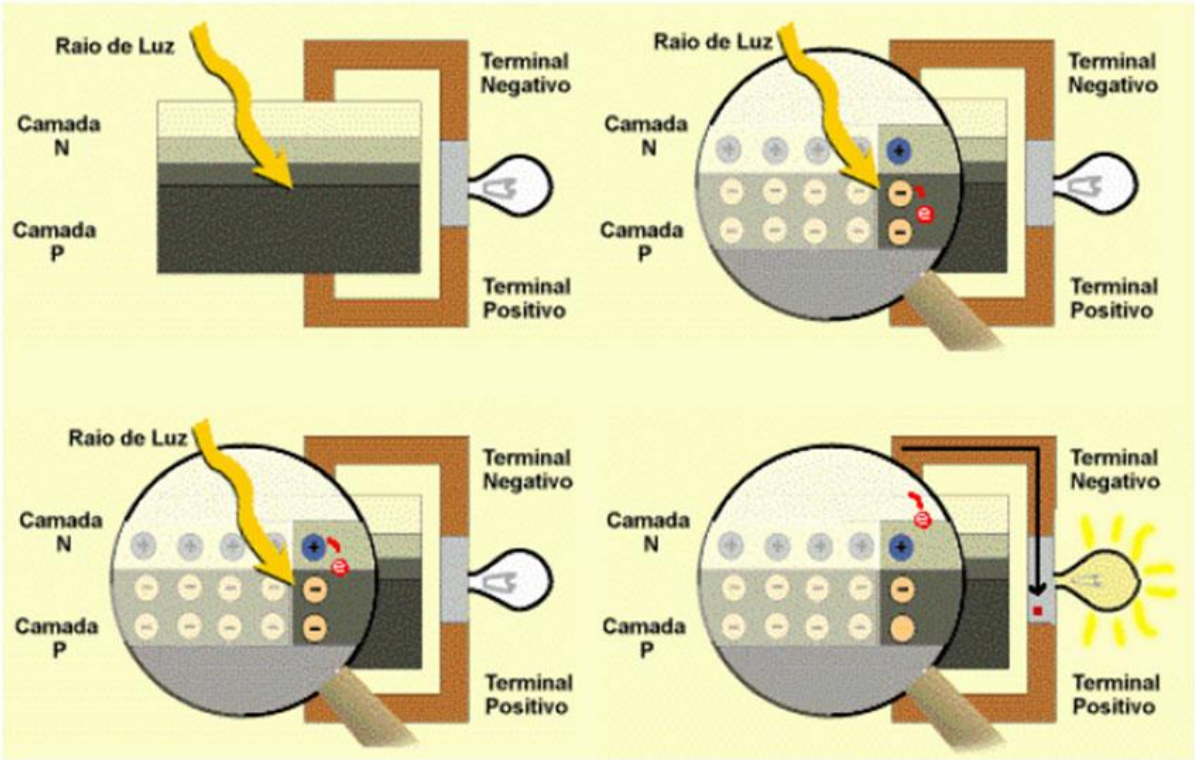
No caso dos concentradores, a radiação solar é concentrada a fim de obter um fluido com altas temperaturas, que por sua vez troca calor e gera vapor e, em decorrência, energia elétrica num sistema térmico. Na Figura 3 é apresentado o concentrador solar na forma de calha parabólica, desenvolvido dentro do projeto de P&D Cemig/Aneel nº 51 (Usina termelétrica solar experimental de 10 kW utilizando concentradores cilíndrico-parabólicos), cuja planta piloto e demonstrativa encontra-se instalada no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) em Belo Horizonte/MG.

Figura 3 – Calha parabólica – P&D nº 51.

É importante ressaltar que, para o caso deste e de outros tipos de concentradores, o sistema de produção de cogeração somente se viabiliza técnica e comercialmente para instalações de grande porte, por questões de economia de escala e também termodinâmicas. Excepcionalmente, há os sistemas de concentração que fazem uso de motores Stirling e naturalmente encontram-se associados a instalações de pequeno porte e à geração distribuída. Um ponto crítico das tecnologias de concentração solar é a necessidade do uso de radiação direta e o elevado impacto da nebulosidade na operação deste sistema. Um exemplo disso é o fato de que, apesar de Belo Horizonte se encontrar em um local de elevada radiação solar, durante um ano de testes houve apenas 8 dias em condições climatológicas adequadas para a produção de energia térmica no sistema experimental do CEFET.

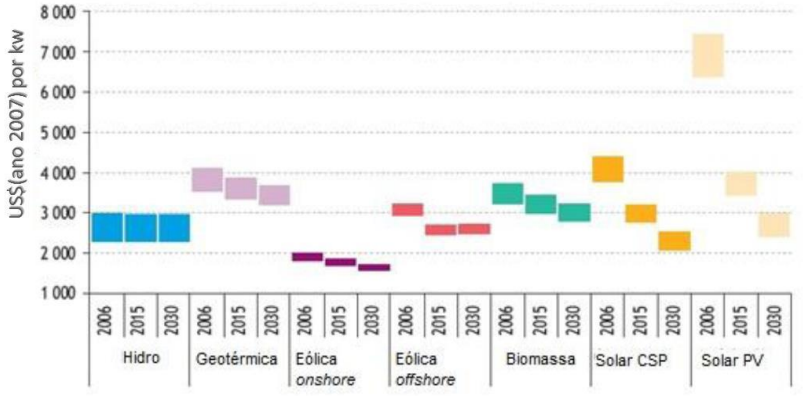
Por sua vez, os painéis fotovoltaicos podem gerar eletricidade diretamente numa ampla faixa de produção. A incidência da luz do Sol no painel promove o efeito fotovoltaico, criando uma corrente elétrica no material e, por consequência, energia elétrica. No efeito fotovoltaico, os elétrons gerados são transferidos entre bandas diferentes dentro do próprio material, resultando no desenvolvimento de tensão elétrica entre os dois eletrodos [6]. Na Figura 4 é possível visualizar o mecanismo do efeito fotovoltaico.

Figura 4 – Painel fotovoltaico – funcionamento [8].

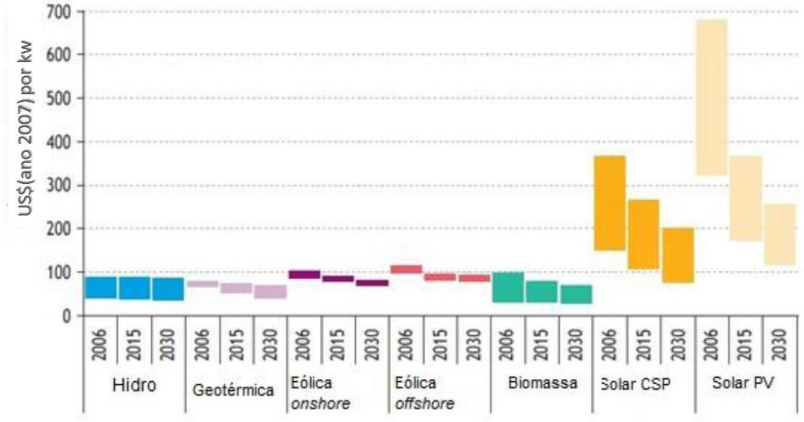


O grande fator limitante para a aplicação, expansão e popularização de sistemas fotovoltaicos para a produção de eletricidade é o custo da tecnologia e, em decorrência disso, o preço da energia gerada. Entretanto, a tendência de queda significativa destes custos (Figura 5), juntamente com os desenvolvimentos tecnológicos associados, tem indicado que num futuro próximo esta fonte terá um papel importante na construção da matriz energética pelos benefícios ambientais. Além disso, as redes inteligentes (smart grid), que se constituem numa tecnologia promissora para a revolução na relação da sociedade com os sistemas energéticos, possuem como um dos pilares a geração local e distribuída, baseada no aproveitamento da energia solar.

Figura 5 – Custos da tecnologia solar: (a) implantação; (b) energia [9].



(a)



(b)

Diante deste cenário, cresce a percepção de que é necessário trabalhar toda a cadeia de produção associada com a energia solar, desde levantamentos mais apurados do potencial, passando pelo desenvolvimento da cadeia produtiva do silício,

até arranjos comerciais que contribuem para viabilizar a tecnologia e os negócios correlatos. Um exemplo disso pode ser visto na chamada de P&D Estratégico da Aneel nº 13/2011, "Arranjos técnicos e comerciais para inserção de projetos de geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira", em decorrência da qual foram selecionados 17 projetos fotovoltaicos, totalizando 23,6 MW, a serem instalados nas diversas regiões do País até 2015, possibilitando aprimorar o conhecimento sobre as diferentes tecnologias deste tipo de geração [10].

B. P&D Cemig/Aneel nº GT 468

Este projeto tem um custo total de R$2,6 milhões e essencialmente seus objetivos são [11]:

- Criação de um conjunto de informações de radiação solar global, composto por informações solarimétricas consistidas, que foram observadas pela Cemig, INMET e outras entidades, assim como por informações calculadas para todos os 853 municípios de Minas Gerais;
- Elaboração do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais nas formas impressa e digital, com destaque para os locais de maior potencial para instalação de usinas solares fotovoltaicas e de termoelétricas solares;
- Desenvolvimento de um *software* que poderá ser utilizado pela Cemig para elaborar simulações com priorização de empreendimentos ou até mesmo para que a empresa negocie o sistema com eventuais empreendedores interessados.

Sendo assim, os produtos do projeto serão uma base de dados, um atlas solarimétrico do estado de Minas Gerais e um *software* que subsidiará decisões técnicas e de viabilidade econômico-financeiras em se tratando de energia solar.

Não somente a concessionária será beneficiada pelos resultados, uma vez que o Atlas Solarimétrico do Estado será um documento público. A parceria Terra Verde será beneficiada com o reconhecimento pelo mercado de sua competência técnica no assunto, induzindo demandas por serviços e consultoria e pela interação com a comunidade científica, principalmente na forma de participação em fóruns afins.

C. Metodologia

A seguir é feita uma breve descrição da metodologia executada na realização do projeto [11]:

- Revisão bibliográfica e levantamento das estações meteorológicas;
- Compilação das informações existentes das estações meteorológicas de Minas Gerais com histórico de mais de 25 anos de dados;
- Instalação e comissionamento das estações solarimétricas;
- Utilização de Redes Neurais nos dados históricos;
- Operação e manutenção das estações solarimétricas – cálculo de correlações;

- Modelagem da radiação solar direta;
- Mapeamento das localidades mais promissoras para sistemas fotovoltaicos fixos de grande porte;
- Obtenção das correlações estatísticas entre a radiação solar direta e global;
- Calibração do sistema de simulação para cada município do estado de Minas Gerais do potencial para construção de usinas solares fotovoltaicas.

20.3 Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais

A referência para esta seção é o próprio Atlas Solarimétrico desenvolvido no P&D GT 468 [12]. Este atlas foi desenvolvido para ir além do mapeamento de radiação solar, nas formas direta, indireta e global. De fato, o principal resultado do atlas é o mapeamento de áreas adequadas para negócios em energia solar e para tal se faz necessário conhecer outros fatores e suas relações, como, por exemplo:

- Caracterização geográfica: o estado de Minas Gerais corresponde a 7% do território brasileiro e possui, atualmente, 4,58 milhões de hectares de áreas protegidas, que estão distribuídas por 430 unidades de conservação;
- Vegetação: com relação aos biomas encontrados em Minas, o tipo cerrado possui a maior extensão do estado. Neste tipo de bioma predominam gramíneas, arbustos e árvores esparsos, as quais têm caules retorcidos e raízes longas, que facilitam a absorção da água. Já a Mata Atlântica, que hoje representa apenas 10% da mata nativa em todo o País, é formada em Minas por uma série de ecossistemas com características próprias. Deste modo, a implantação de projetos energéticos deve levar em conta o mapeamento das áreas protegidas para evitar impedimentos de ordem ambiental;
- Unidades de conservação e terras indígenas: o Estado possui atualmente 4,58 milhões de hectares de áreas protegidas, que estão distribuídas por 430 unidades de conservação;
- Climatologia: o Estado possui cinco tipos climáticos predominantes: tropical de monção; tropical de savana com estação seca de inverno; de estepe quente; temperado úmido com inverno seco e verão quente e temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente. As séries históricas de precipitação utilizadas no projeto foram fornecidas pela Cemig, pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pelo Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM), pelas Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras), por Furnas e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Temperatura: as máximas e mínimas locais mensais foram fundamentadas em dados obtidos em 52 estações meteorológicas. Para efeito de estudo, fatores como localização geográfica e tipo de relevo foram considerados como determinantes, uma vez que exercem influência na temperatura de Minas Gerais, onde predominam as maiores médias de temperatura, máximas e mínimas nas

regiões Centro-Oeste, Noroeste e Triângulo. A variação da temperatura média anual vai de 17°C a 20°C em regiões mais elevadas e de 20°C a 23°C em locais de menor altitude. Na Figura 6 é apresentada uma das estações utilizadas, instalada na cidade de Diamantina (MG). Esta estação é completamente equipada por instrumentos e automatizada, a fim de coletar e tratar as informações de forma melhor e mais eficiente, possibilitando diversas análises;

Figura 6 – Estação climatológica de Diamantina (MG).

- Demografia: a população estadual é formada por 9.641.877 homens e 9.955.453 mulheres, registrando um grau de urbanização de 85,29%. A taxa média geométrica da população de crescimento anual da população entre os anos 2001-2010 foi de 0,91% a.a. O crescimento populacional é explicado pela evolução dos componentes da dinâmica demográfica: fecundidade, mortalidade e migração;

- Consumo de energia: o destaque tem sido o aumento significativo da participação de fontes alternativas de energia, que correspondem a 53,6% das fontes utilizadas. É relevante a utilização de lenha e madeira de florestas energéticas como biorredutor e energético no processo de produção de aço. Os principais centros consumidores do Estado são a região metropolitana de Belo Horizonte e seu entorno, a Zona da Mata – em Juiz de Fora – e o Triângulo Mineiro. As microrregiões com menor consumo e também com menores densidades populacionais estão localizadas no Norte, Noroeste e Nordeste mineiro;

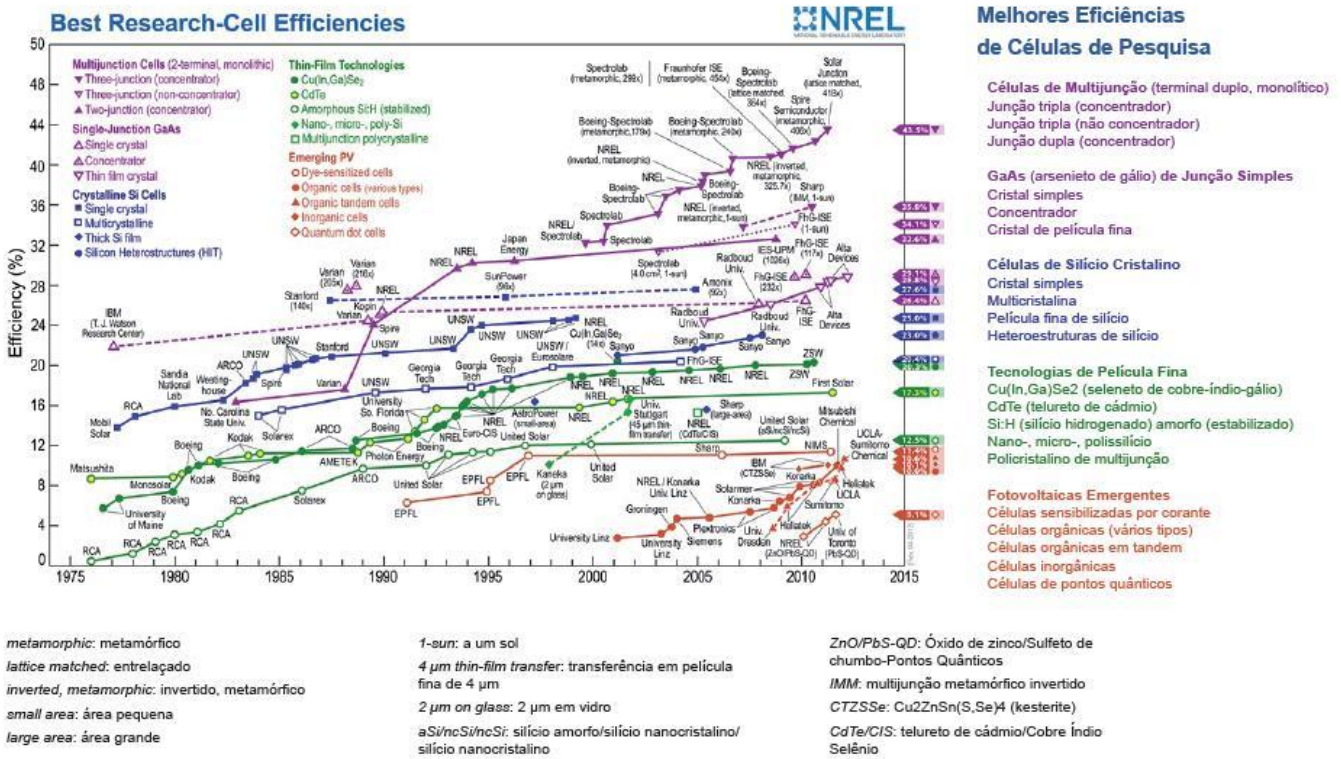
- Situação de infraestrutura: neste item, os mapeamentos importantes são das vias de acesso e do sistema elétrico. O estado possui 8.957 km de rodovias federais e 26.604 km de rodovias, sendo que aproximadamente 7.000 km não são pavimentados. A malha ferroviária possui cerca de 5.000 km. Minas Gerais

apresenta também muitos trechos navegáveis em rios e uma infraestrutura aeroportuária razoável. A infraestrutura do sistema elétrico do Estado possui mais de 370 empreendimentos em operação, com uma potência instalada de quase 20.000 MW. A Cemig é a principal concessionária estadual, atendendo a 805 dos 853 municípios, através de uma rede de distribuição acima de 400 mil km de extensão. De forma ilustrativa, é apresentado na Figura 7 o mapeamento do setor elétrico. O conhecimento desta infraestrutura permite verificar a necessidade de investimentos de conexão e também identificar o ponto de partida para estudos de impactos na rede pela implantação de sistemas de produção de eletricidade.

Além dos mapeamentos realizados, o desenvolvimento do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais fez uma ampla revisão bibliográfica com o levantamento do estado da arte da tecnologia de energia solar e do seu desenvolvimento no estado de Minas Gerais. A Figura 8 apresenta a evolução tecnológica em energia solar segundo o National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Figura 7 – Infraestrutura do sistema elétrico de Minas Gerais.

Figura 8 – Evolução tecnológica em energia solar.



Melhores Eficiências de Células de Pesquisa

Células de Multijunção (terminal duplo, monolítico)
Junção tripla (concentrador)
Junção tripla (não concentrador)
Junção dupla (concentrador)

GaAs (arsenieto de gálio) **de Junção Simples**
Cristal simples
Concentrador
Cristal de película fina

Células de Silício Cristalino
Cristal simples
Multicristalina
Película fina de silício
Heteroestruturas de silício

Tecnologias de Película Fina
Cu(In,Ga)Se2 (seleneto de cobre-índio-gálio)
CdTe (telureto de cádmio)
Si:H (silício hidrogenado) amorfo (estabilizado)
Nano-, micro-, polissilício
Policristalino de multijunção

Fotovoltaicas Emergentes
Células sensibilizadas por corante
Células orgânicas (vários tipos)
Células orgânicas em tandem
Células inorgânicas
Células de pontos quânticos

metamorphic: metamórfico
lattice matched: entrelaçado
inverted, metamorphic: invertido, metamórfico
small area: área pequena
large area: área grande

1-sun: a um sol
4 µm thin-film transfer: transferência em película fina de 4 µm
2 µm on glass: 2 µm em vidro
a*Si/ncSi/ncSi*: silício amorfo/silício nanocristalino/ silício nanocristalino

ZnO/PbS-QD: Óxido de zinco/Sulfeto de chumbo-Pontos Quânticos
IMM: multijunção metamórfico invertido
CTZSSe: Cu2ZnSn(S,Se)4 (kesterite)
CdTe/CIS: telureto de cádmio/Cobre Índio Selênio

A. Processo de Mapeamento Solarimétrico

O processo de mapeamento seguiu a estrutura apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Esquema para mapeamento do Atlas Solarimétrico.

A mensuração da radiação solar incidente é feita através de instrumentos que registram basicamente a sua potência e duração, como por exemplo:

- Heliógrafo: mede a duração da insolação (número de horas de brilho solar); opera a partir da focalização da radiação solar sobre uma fita, que, sob o efeito da exposição, fica enegrecida;
- Actinógrafo (ou piranógrafo): mede a radiação solar total ou sua componente difusa, possuindo o sensor e o registrador na mesma unidade;
- Piranômetro: mede a radiação solar total que chega à superfície da Terra, seja ela direta, difusa ou refletida:

- Piranômetro fotovoltaico: possui como elemento sensor uma célula fotovoltaica usualmente de silício monocristalino;

- Piranômetro termoelétrico: o elemento sensível é uma pilha termoelétrica, constituída por pares termoelétricos em série. Há duas versões:

a)Piranômetro com detector pintado de preto e branco: as juntas quentes das termopilhas estão em contato com superfícies negras, altamente ab-

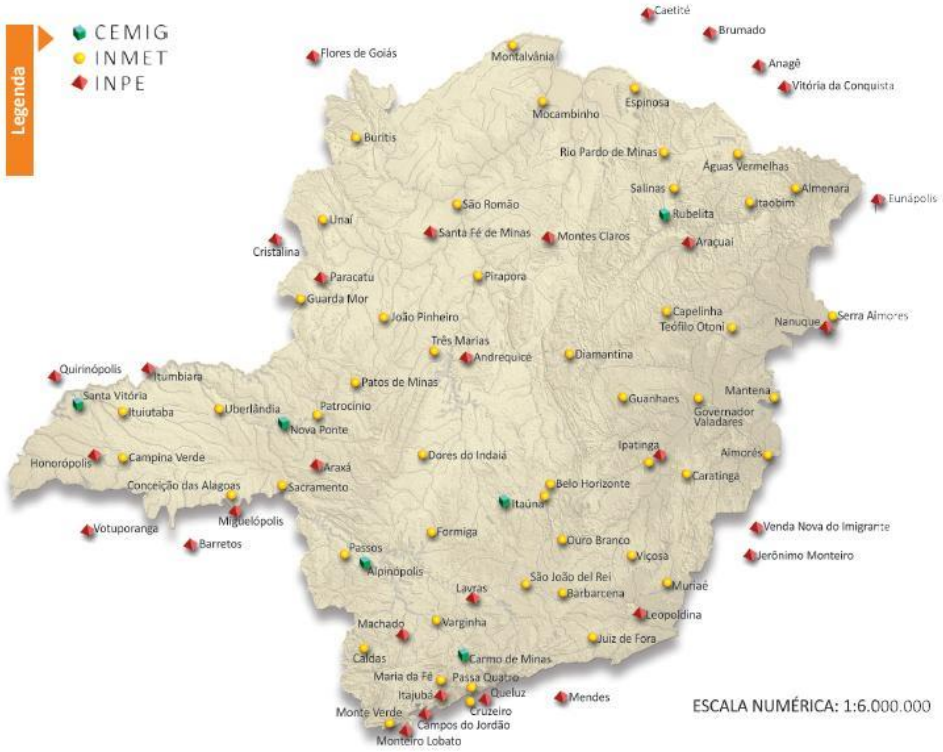
sorventes, e as frias em contato com as superfícies brancas de grande refletividade;

b)Piranômetro com superfície receptora totalmente enegrecida: existe um contato térmico com as juntas quentes e frias, associadas a um bloco de metal de grande condutividade térmica, colocadas no interior do instrumento, resguardadas da radiação solar e tendo aproximadamente a temperatura do ar.

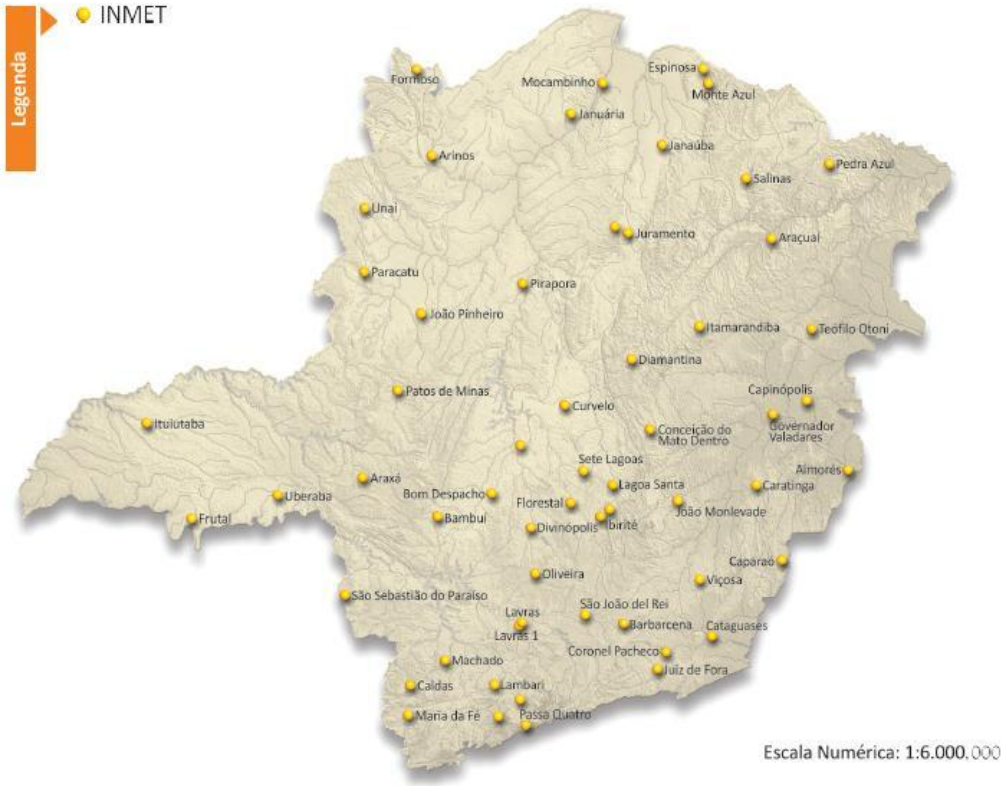
- Pireliômetro: mede a radiação solar direta. Possui uma pequena abertura para alcançar apenas o disco solar e a região vizinha (circunsolar), de maneira que este instrumento é constantemente ajustado, de acordo com a trajetória do Sol.

As informações solarimétricas são escassas na maioria dos estados brasileiros, por causa do alto custo dos instrumentos utilizados na obtenção de dados, como também pela grande extensão territorial do País. A complementação de informações é feita mediante modelagens baseadas em modelos estatísticos estacionários e/ou sequenciais, da estimação via imagens de satélites ou mediante o uso de Redes Neurais Artificiais. Na Figura 10 são indicadas as estações coletoras de dados para a elaboração do atlas.

Figura 10 – Estações solarimétricas: (a) piranômetro e (b) heliógrafo.



(a)


Legenda
INMET
Formoso
Mocambinho
Espinosa
Monte Azul
Januária
Janaúba
Arinos
Pedra Azul
Salinas
Unaí
Juramento
Araçuaí
Paracatu
Pirapora
João Pinheiro
Itamarandiba
Teofilo Otoni
Diamantina
Patos de Minas
Capinópolis
Curvelo
Governador Valadares
Ituiutaba
Conceição do Mato Dentro
Sete Lagoas
Araxá
Almenara
Lagoa Santa
Caratinga
Uberaba
Bom Despacho
Florestal
João Monlevade
Frutal
Bambuí
Divinópolis
Ibirité
Caparaó
Oliveira
Viçosa
São Sebastião do Paraíso
São João del Rei
Lavras
Barbacena
Cataguases
Lavras 1
Coronel Pacheco
Machado
Juiz de Fora
Caldas
Lambari
Maria da Fé
Passa Quatro
Escala Numérica: 1:6.000.000

(b)

A radiação solar na superfície da Terra está relacionada com a radiação absorvida de forma direta e pode ser calculada quando é dado o albedo, que é a refletividade da superfície terrestre. Com o intuito de estimar a radiação solar absorvida pela atmosfera e o albedo foram criados dois métodos:

- Estatístico: trata-se da medição experimental simultânea do radiômetro do satélite e a radiação solar total local na superfície terrestre;
- Físico: baseia-se na modelagem física dos processos radioativos decorrentes da passagem de luz solar pela atmosfera.

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) têm sido aceitas como uma metodologia alternativa para análise de problemas de engenharia de grande complexidade e imprecisamente definidos. A radiação solar pode ser considerada um problema clássico a ser abordado por RNAs pelas seguintes considerações:

a) o sistema climático no qual está inserida a radiação solar é complexo, imprecisamente definido e tem muitos parâmetros físicos inter-relacionados;

b) existe uma quantidade muito grande de informações meteorológicas em nível espacial e temporal, rotineiramente medidas em estações meteorológicas. As RNAs se mostram apropriadas pela sua capacidade de manejar bem as sequências temporais de radiação solar com falhas (é frequente a ocorrência de falhas na sequência temporal), trazendo robustez ao processo.

Uma vez constituído e consolidado o banco de dados de mapeamento solarimétrico, é possível observar os resultados nas Figuras 11 e 12.

Considerando todos os mapeamentos e aspectos relevantes e tendo como foco a definição de regiões mais apropriadas para empreendimentos de produção de energia elétrica, é apresentado na Figura 13 o produto final do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais.

Figura 11 – Radiação solar global diária (plano horizontal) – média anual (kWh/m²/dia).

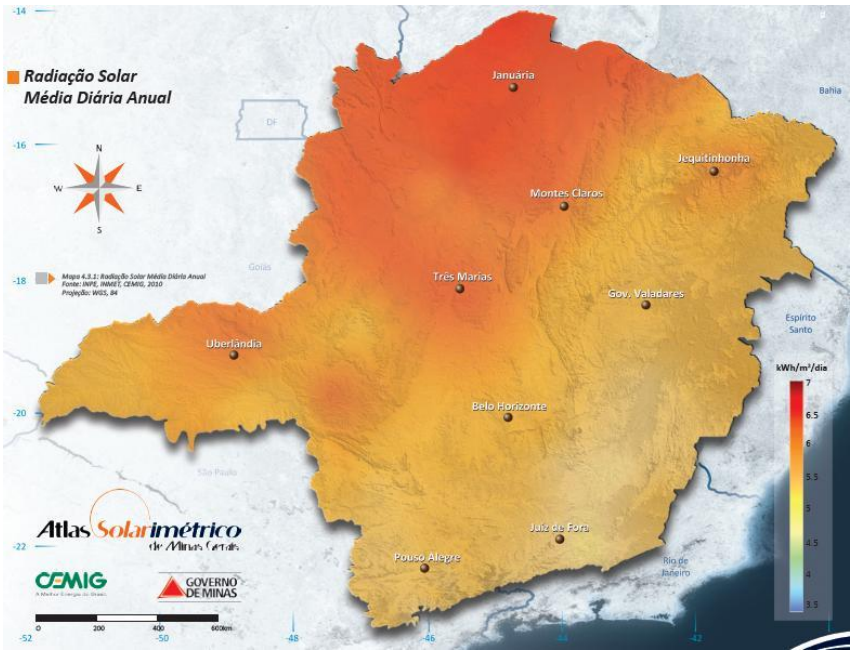


Figura 12 – Insolação diária – média anual (horas).

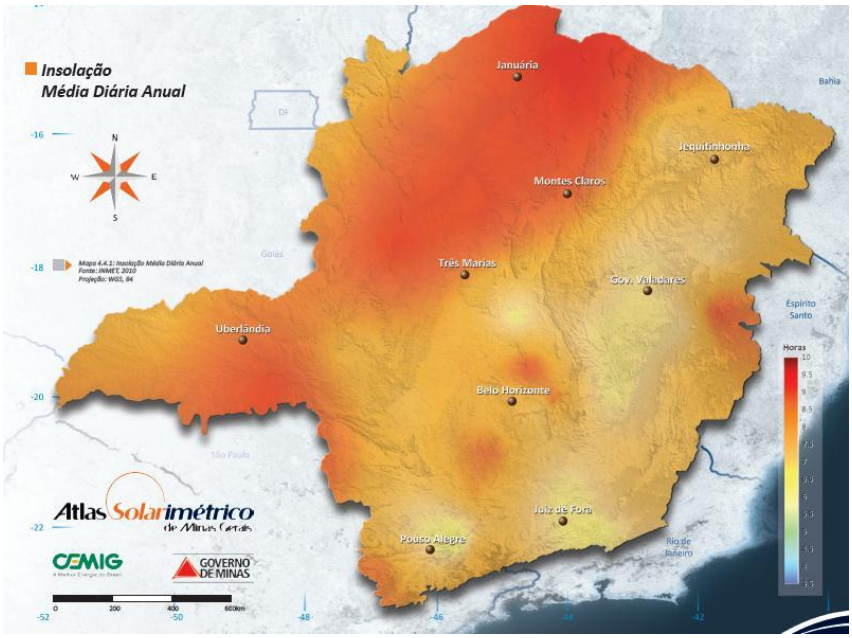
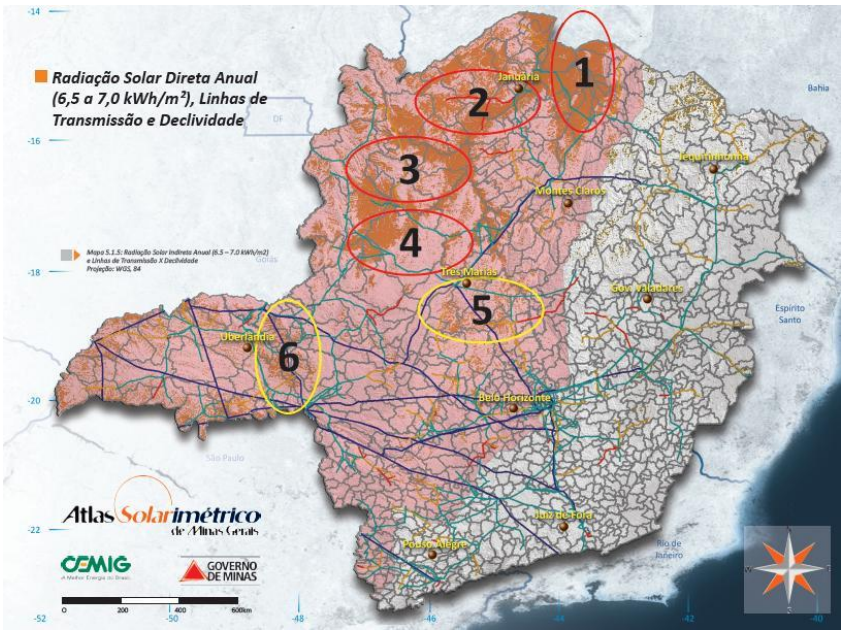


Figura 13 – Radiação solar direta anual; linhas de transmissão e declividades – Regiões mais promissoras para empreendimentos solares.



Os estudos aqui desenvolvidos e apresentados identificaram um potencial bastante promissor de geração de energia solar, seja termoelétrica ou fotovoltaica, chegando a uma radiação solar direta anual de 2.700 kWh/m² no verão e de cerca de 2.200-2.400 kWh/m² em bases anuais. Este potencial poderá ser explorado gradativamente a médio prazo com o esgotamento de outras fontes de suprimentos, assim como com o avanço tecnológico. A perspectiva é de que, com a geração de fonte solar, haja um aumento da segurança da oferta de energia elétrica, tanto pelo seu caráter intrinsecamente distribuído como também pela melhoria no mix de suprimento. Cabe ressaltar finalmente a forte coincidência dos locais mais promissores para aproveitamento de energia solar de grande porte com os de energia eólica, o que permitirá criar um complexo de sistemas híbridos solar-eólicos [12].

20.4 Conclusões

Este artigo apresentou os resultados parciais alcançados no âmbito do projeto de P&D GT 468. O resultado mais significativo deste projeto até o momento é o Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais. Este atlas já representa um avanço significativo na disponibilidade de informações sobre energia solar no estado de Minas Gerais. Tais informações são relevantes não apenas para as concessionárias de energia, mas também para a sociedade e até mesmo para o cidadão comum. A expectativa para os demais produtos deste projeto permanece firme e promissora, principalmente em relação ao *software* que subsidiará a implantação de empreendimentos solares.

Capítulo 21

Capítulo 21: Aquecimento Solar Distrital para Habitações de Interesse Social[21]

***Resumo*- O projeto trata do desenvolvimento de modelos para aquecimento distrital para habitações de interesse social. Devido à sua interdisciplinaridade, o projeto foi dividido em quatro grupos: Aquecimento Solar, Arquitetura e Sociologia, Modelagem e Otimização e Monitoração e Controle. Esse artigo trata das atividades dos três primeiros grupos, devido à interrupção do projeto, a pedido da instituição executora. O grupo Aquecimento Solar elaborou indicadores de qualidade para obras de grande porte, fornecendo subsídios para os parâmetros técnicos do programa computacional. O grupo Arquitetura e Sociologia elaborou extensiva avaliação das configurações típicas dos conjuntos habitacionais brasileiros, como COHAB-MG, incluindo locais de implantação, características físicas e legais e perfil da população. Os resultados preliminares obtidos geraram indicadores de inserção arquitetônicos e sociais, norteadores ao desenvolvimento do *software* e à implantação do estudo de caso. O *software* permite a definição de parâmetros otimizados de distribuição de água quente, considerada crítica em sistemas distritais.**

21.1 Introdução

O aquecimento distrital pode ser definido como um sistema que gera e distribui energia térmica, utilizando água ou outro fluido de transporte, para produzir aquecimento de ambientes e de água para fins sanitários.

Atualmente esse tipo de sistema é altamente utilizado nos países do Norte da Europa como Islândia, Dinamarca e Alemanha, cuja penetração é de 90%, 50% e 12%, respectivamente. Nesses países, a energia é gerada através de geotermia, energia solar ou outras fontes, sendo usada nos setores residencial, comercial e industrial. No entanto, o uso dessa tecnologia em países em desenvolvimento ainda é inovador, notadamente em habitações de interesse social. Entretanto, acredita-se que essa tecnologia possa minimizar problemas de pós-venda dos coletores e reservatórios e da falta de manutenção, recorrente em todas as avaliações feitas no país. Outro ponto a se destacar é seu emprego em Programas de Eficiência Energética (PEE-ANEEL) que visa atender com energia solar as moradias de famílias participantes dos programas sociais do Governo Federal e cujas moradias, na maioria dos casos, não possuem os requisitos estruturais mínimos para a instalação do aquecedor solar nos telhados.

Um sistema de aquecimento solar distrital possui singularidades típicas dos sistemas de grande porte, mas com grande complexidade na distribuição da hidráulica da água quente. O *software* elaborado busca apoiar engenheiros e projetistas nessa

[21] PEREIRA, E. M. D.; ANDRADE, A. S.; CARVALHO, L. P.; CHAVES, C. C. P.; MEDEIROS, V. A.; LOPES, B. M.; SILVA, K. de F.; FARIA; L. P. P. e HUEBNER, R..

tarefa. Os indicadores arquitetônicos e sociais foram levantados a partir do estudo de conjuntos habitacionais construídos pela Companhia de Habitação de Minas Gerais (COHAB-MG) no ano de 2008, através do programa Lares Geraes.

21.2 Estudo de Indicadores Arquitetônicos

No Brasil, a grande demanda por habitação urbana deu origem a projetos e práticas de construção bastante similares em todo o país. Consenso esse que justifica a limitação da análise aos conjuntos da COHAB-MG. Para caracterizar o conjunto habitacional, os aspectos considerados foram: número de casas por conjunto, tamanho e geometria de quadras e lotes, configuração e inserção de ruas, ocupação de lotes, características da habitação, distância da instalação sanitária em relação à rua e mudanças pós-ocupação.

A. Metodologia

Inicialmente, foi elaborado um catálogo com 34 conjuntos construídos em 9 regiões do estado de Minas Gerais no ano de 2008, selecionados pelo programa Google Earth, Figura 1. Em seguida, procedeu-se ao agrupamento por características similares, sendo a amostra reduzida para 12 comunidades.

Figura 1 – Visualização de Conjunto Habitacional pelo Google Earth.

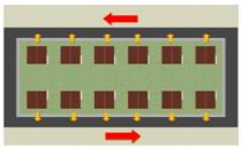
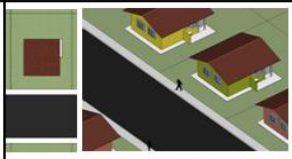
Os conjuntos selecionados foram digitalizados para possibilitar análises de tamanho e ocupação de quadras e lotes, quantificação de casas, largura e configuração de vias e calçadas, bem como identificação de mudanças pós-ocupação.

Os exemplos obtidos foram agrupados de acordo com aspectos quantitativos e qualitativos. Os dados foram organizados em uma tabela para melhor identificação das características mais expressivas e dominantes dos conjuntos. A partir dessa avaliação, foram propostos indicadores arquitetônicos para a inserção do sistema de aquecimento solar distrital.

B. Resultados

O escopo do projeto P&D 183 previa a instalação de um sistema de aquecimento solar distrital em um conjunto habitacional que deveria conter cerca de 60 residências. Tal definição tornou-se o primeiro indicador arquitetônico: tamanho do conjunto. Outro aspecto importante é a necessidade de redução de custos com bombeamento, assim como da própria instalação, o que leva à necessidade de otimização do sistema. Para atingir esses objetivos definiu-se que o conjunto ideal para a implantação do distrital seria o que apresentasse geometria regular e baixa declividade do terreno (aproximadamente 15% para reduzir os custos de bombeamento). Também foi identificado que a ocupação frontal do lote seria mais interessante por gerar uma proximidade maior entre a instalação sanitária e a tubulação de água quente, localizada na rua. A Tabela I mostra, de maneira resumida, os indicadores arquitetônicos obtidos através da pesquisa.

Tabela I – Resumo de indicadores arquitetônicos.

Caracteristicas	Indicatidores	Exemplo
Número de casas	Menos de 60 casas.	
Geometria das quadras	Quadra poligonal.	
Ocupação das quadras	Distribuição residencial linear ou em fita.	
Ocupação dos lotes	Porção frontal do terreno.	
Locação do banheiro em relação a via	Porção lateral da casa.	

A área média construída nas unidades habitacionais, mostrada na planta baixa da Tabela 2, é de 36,27 m².

21.3 Estudo de Indicadores Sociais

O aquecimento solar distrital deve considerar também características sociológicas da comunidade contemplada.

Para isso é necessário compreender o ambiente construído e o tipo de ocupação dos moradores. O estudo de Indicadores Arquitetônicos mostra a ocorrência de modificações em 48% das casas estudadas. Com esse número vê-se que a população promove melhorias nas habitações entregues adaptando-as as suas necessidades.

A inserção de nova tecnologia no cotidiano dos moradores também deve ser estudada principalmente no que diz respeito a sua aceitação e avaliação qualitativa. Para isso tomou-se como base o estudo de caso de Contagem-MG (FANTINELLI, 2006).

A. Metodologia

Para realizar a caracterização das famílias, cinco fontes de informação foram selecionadas para compor o estudo que é finalizado através de cruzamentos e conclusões retiradas da bibliografia, ilustrados na Figura 2.

Figura 2. Estratégia para obtenção de indicadores sociais

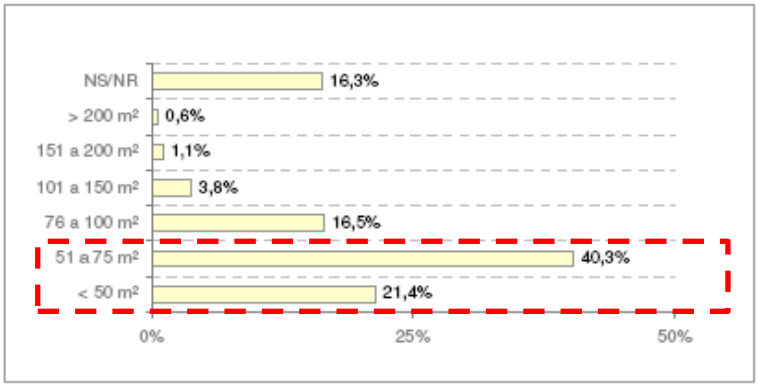
B. Resultados

Para definição dos Indicadores Sociais, os seguintes fatores foram avaliados: renda familiar, área residencial construída, número de moradores/casa, consumo de energia elétrica, compartilhamento de chuveiro elétrico e tempo médio de banho.

A definição de renda seguiu a determinação do Programa Lares Geraes de enquadramento dos mutuários na faixa de renda 1 a 3 salários mínimos, similar ao perfil sócio-econômico da bibliografia mencionada na Figura 2, sendo considerada uma média de 4 habitantes por residência.

Segundo o PROCEL (2007), 61,7% das residências, cuja área construída é inferior a 75m², apresentam consumo de energia elétrica na faixa de 0 a 200 kWh/mês, Gráfico 1.

Gráfico 1 – Área construída dos domicílios na faixa 1 de consumo (0 - 200 kWh/mês) (PROCEL, 2007).



Outro dado relevante é o compartilhamento de um mesmo chuveiro elétrico pela família em 87,5% das residências, Procel (2007) com tempo de banho inferior a 10 minutos em 48,3% dos casos. Assim, definiu-se essa faixa como a mais adequada para adoção no caso dos moradores dos conjuntos habitacionais da COHAB-MG.

A Tabela II resume o perfil sócio-econômico e de consumo de energia elétrica das famílias da COHAB-MG definido neste projeto

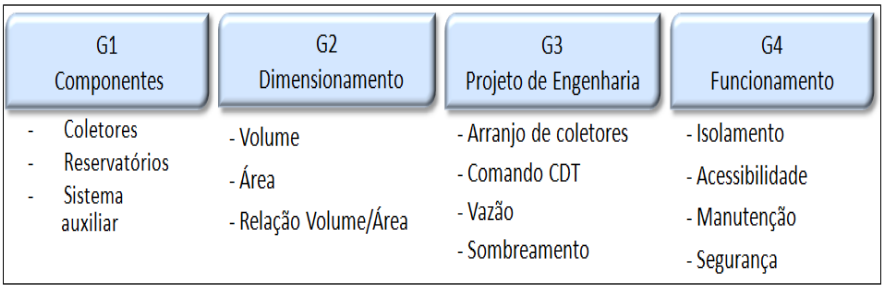
Tabela II – Perfil sócio-econômico e de consumo de energia elétrica.

Renda	**Área Construída**	**Nº Moradores**
1 a 3 SM	36,27 m²	4
Consumo Energia	Compartilhamento chuveiro elétrico	Tempo médio de banho
0 a 200 kWh	3 – 4 pessoas	< 10 min

A avaliação das modificações pós-ocupação realizadas pelos moradores é importante para que o dimensionamento do sistema de aquecimento solar atenda a um possível aumento na demanda de água quente decorrente do aumento do número de pessoas ou do nível de conforto requerido. Entretanto, estudos realizados por Guimarães (2007) concluíram que o banheiro é o cômodo da moradia que menos apresenta modificações pós-ocupação.

21.4 Indicadores Técnicos de Qualidade

O trabalho desse subgrupo teve como objetivo estabelecer indicadores de qualidade para o circuito primário das instalações de aquecimento solar de médio e grande porte com base em avaliações de campo e simulações matemáticas, com base em quatro grupos de avaliação:



Os indicadores seriam posteriormente testados e avaliados no circuito primário do estudo de caso, inicialmente proposto.

A. Metodologia

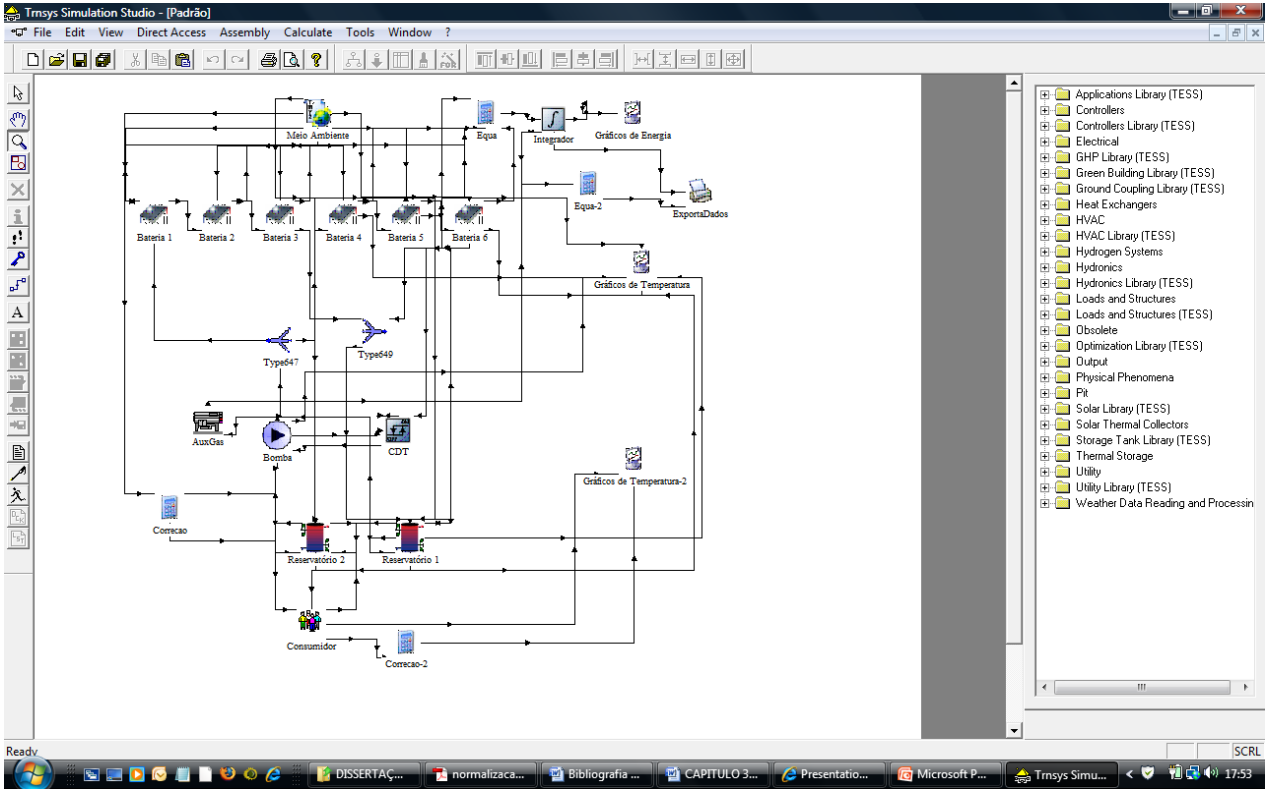
A metodologia desse trabalho foi dividida em seis etapas distribuídas na realização de ensaios experimentais laboratoriais bem como simulações computacionais.

Etapa 1 – Levantamento de campo da situação atual das Instalações de Aquecimento Solar: com base no levantamento realizado no âmbito do Projeto Eletrobras (ECV 184/2006) de Avaliação de Instalações de Aquecimento Solar no Brasil em Belo Horizonte para 96 edifícios com aquecimento solar central de água.

Etapa 2 – Consolidação dos resultados da pesquisa de campo para os subsistemas captação, armazenamento, bombeamento e distribuição hidráulica (circuito primário), aquecimento auxiliar e de controle e comando.

Etapa 3 – Simulações Computacionais e Planejamento de simulação, utilizando-se o *software* TRNSYS para uma instalação padrão com consumo total diário de 6000 litros de água quente, correspondendo a 30 habitações de interesse social. O layout básico é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Tela capturada no *software* TRNSYS da instalação controle.



Para se identificar a influência do funcionamento de cada um dos componentes selecionados no desempenho da instalação foi estabelecida a seguinte sequência de simulações, tomando como base a instalação controle:

Tabela III – Parâmetros da simulação computacional.

Características do Coletor Solar	**Eficiência da aleta (0,96; 0,93; 0,85; 0,8; 0,7)** **Absortividade da placa (0,9)** **Emissividade da placa (0,9; 0,1; 0,05)**		
Coeficientes de perda no reservatório	3 W/m².K		6 W/m².K
Temperatura de setup Sistema auxiliar	45°C	50°C	60°C
Variação do volume armazenado	0%	-10%	-25%
Configurações do CDT	Ton = 2°C Toff = 5°C	Ton = 3°C Toff = 7°C	Ton = 3°C Toff = 9°C
Vazão da Bomba	1440 l/min	720 l/min	2160 l/min

▲

Instalação Controle

Etapa 4 – Ensaios Laboratoriais para avaliação da influência da periodicidade de limpeza dos vidros e do sombreamento, utilizando-se o simulador solar, Figura 4.

Figura 4 – Detalhe anteparo utilizado para simular o sombreamento.

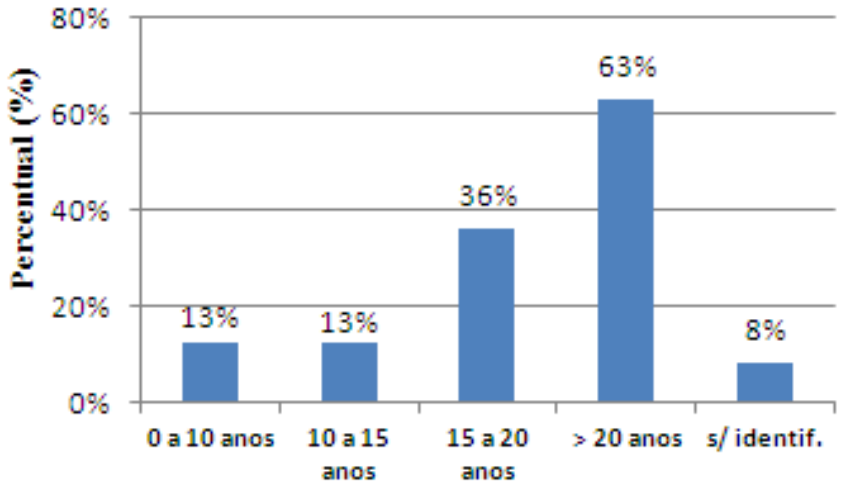
Etapa 5 – Identificação de indicadores qualitativos e quantitativos para a instalação de aquecimento solar central.

A. Resultados

A pesquisa de campo realizada na primeira etapa do projeto avaliou 3610 coletores solares, perfazendo 7795 m² com volume de água quente armazenado de 530.247 litros, resultando em um volume médio por instalação de 5.523 litros. Dessas instalações, 63,5% possuíam mais de 10 anos de operação, 12,9% entre 10 e 15 anos e 3,5% mais de 15 anos. Nos demais, a data inicial não pode ser identificada. Em 70% dos casos, o aquecimento auxiliar é feito com GLP e em apenas 30% o backup é elétrico.

Para avaliar a qualidade dos equipamentos existentes nas instalações de aquecimento solar foram observadas diversas características dos coletores, a saber: oxidação, trinca e quebra dos vidros, infiltração, deterioração da tinta e do isolante térmico, deformação e oxidação dos suportes dos coletores. Todos esses dados foram relacionados ao ano de instalação dos sistemas para avaliação da vida útil dos produtos em operação. Como exemplo, são mostrados no gráfico 2 os problemas de infiltração que, conforme esperado, crescem com o período de funcionamento da instalação, chegando a situações críticas como o caso da Figura 5.

Gráfico 2 – Participação percentual de coletores com infiltrações em função do ano de instalação. Fonte: os autores.



Foram feitas mais de 160 simulações computacionais se apresentaram muito importantes para a verificação e complementação de parâmetros do sistema e que não puderam ser avaliados em campo. Como exemplo pode-se citar a configuração do CDT, a avaliação da influência dos perfis de demanda no rendimento da

instalação, bem como a variação de volume de armazenamento e perdas térmicas nos reservatórios.

Figura 5 – Exemplo de coletor com problema gravíssimo de infiltração. Fonte: os autores.

Para sua elaboração, foram combinadas características intrínsecas aos produtos disponíveis no mercado brasileiro tais como: pinturas sem seletividade e com seletividade, eficiências de aletas que abrangem coletores com classificação de "A" a "D" no PBE/INMETRO, além de perdas, nos reservatórios, reduzidas e elevadas.

Com base nos resultados experimentais e simulados, elaborou-se uma relação de indicadores de qualidade associados a uma proposta de pontuação para qualificar uma instalação de aquecimento solar em operação.

Para aplicação da metodologia desenvolvida, a instalação de aquecimento solar foi dividida em três grupos (componentes, circuito primário e fração solar) pontuados conforme sugestão apresentada em Andrade (2009), dissertação de mestrado desenvolvida no âmbito desse projeto.

21.5 *Software*: Distrital Solar

Os critérios mínimos adotados na seleção do modelo de otimização do programa para o circuito secundário da instalação solar foram: minimização da recirculação requerida, do consumo de energia no bombeamento, do diâmetro das tubulações no circuito secundário e das perdas térmicas na rede de distribuição.

A versão 1 do programa trata de: dimensionamento otimizado dos diâmetros das tubulações de alimentação e retorno (sub ramais, ramais e prumadas de alimentação) garantindo desta forma o menor custo possível de instalação, e da determinação das perdas de carga em cada trecho da rede prevendo a necessidade de instalação de bombas hidráulicas de recirculação.

A versão 2 do programa, implementada na plataforma C++ Builder, inclui a avaliação do comportamento térmico de cada parte da rede e de suas varíaveis estratégicas, a fim de proporcionar o melhor isolamento térmico e a melhor profundidade para instalação dos tubos de distribuição. Essa versão permite, ainda, dimensionar dois tipos de bombas hidráulicas: a bomba de primer (deixando o reservatório de água quente) e as bombas de recirculação que controlam a distribuição de água em cada bloco.

A. Metodologia

As rotinas computacionais estão fundamentadas nas equações clássicas de conservação de energia, do momentum e de massa. Na versão 1, tais rotinas foram implementadas no *software* EES (Engineering Equation Solver) e geraram uma matriz de resultados com a consolidação dos ganhos e a identificação das desvantagens de cada configuração encontrada.

Na versão 2, com a inserção das equações de transferência de calor, houve um aumento significativo da complexidade do programa. Assim, para facilitar a análise dos resultados, minimizando o número de variáveis adotou-se a metodologia proposta do Teorema de PI de Buckingham. Para exemplificar sua importância, no caso 16 moradias organizadas em quatro blocos com quatro habitações por bloco, o programa manipula cerca de 11.490 variáveis que agora são resumidas a oito grupos adimensionais.

O programa apresenta uma plataforma amigável e iterativa, permitindo ao usuário resultados rápidos e confiáveis, sendo algumas telas de entrada mostradas nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Tela de entrada dos acessórios hidráulicos.

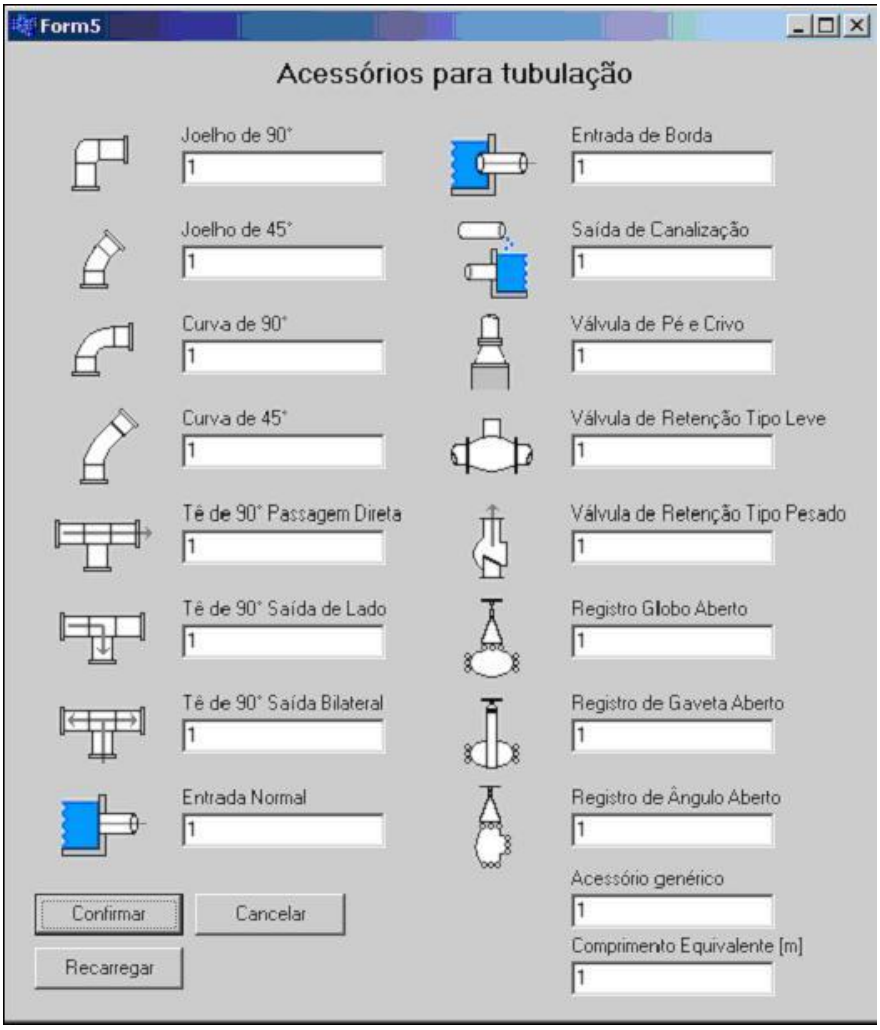
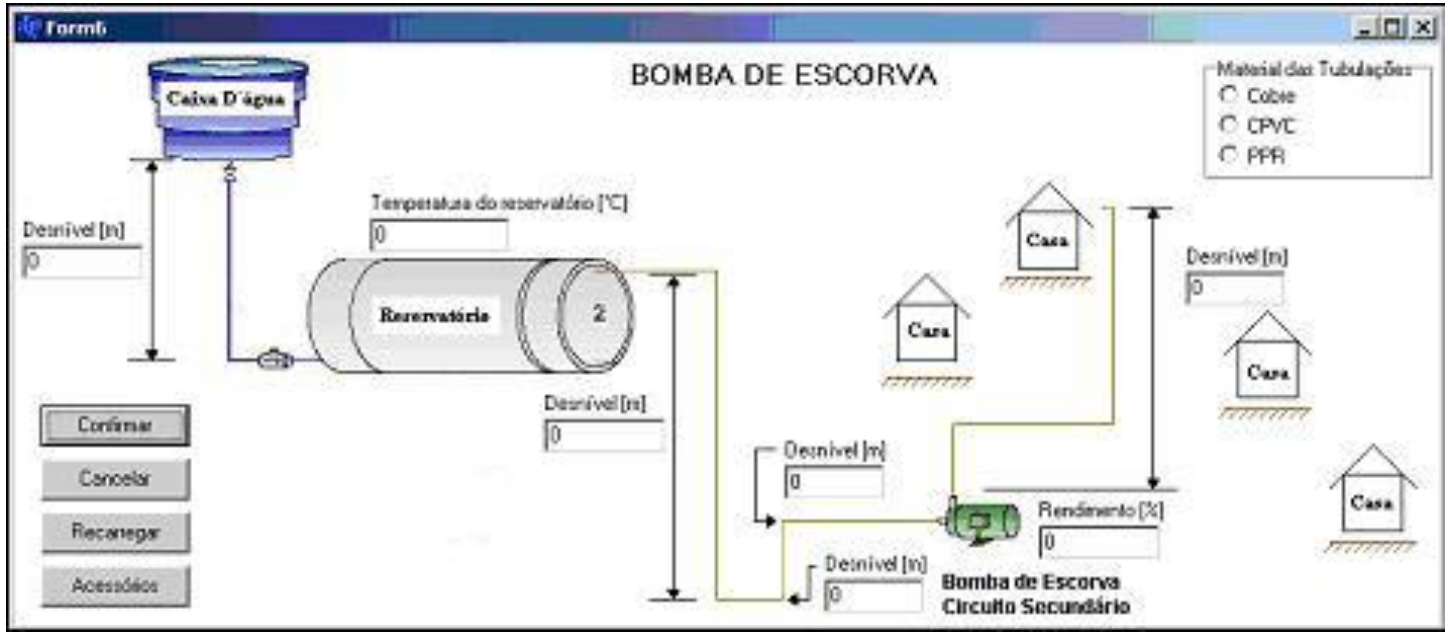


Figura 7 – Bomba de escorva.



B. Resultados

Como o volume de informações geradas é muito grande, o usuário deve acessar o menu do programa através da barra de ferramentas em "Windows/Parametric Table".

As telas mostram alguns dados pré-definidos como: espessuras do isolamento para cada trecho da rede (eiso) e profundidade do solo em relação às tubulações (esolo).

Resumidamente, a tela de resultados fornece todas as variáveis não matriciais, ou seja, não são armazenadas ao longo do tempo, pois sua evolução temporal não é importante para o algoritmo matemático.

As variáveis (Vazão, Pressão, Diâmetro e Temperatura) são visualizadas em "Arrays" e "Parametric Table".

21.6 Conclusões

A elaboração de indicadores arquitetônicos e sociais permitiu definir o cenário de análise para a inserção do sistema de aquecimento solar distrital.

As características peculiares dos conjuntos habitacionais existentes no Brasil, bem como os aspectos climáticos do nosso país fizeram com que essa análise se tornasse essencial para o desenvolvimento e adaptação da tecnologia à condição brasileira.

Com base nos ensaios experimentais, resultados de pesquisas de campo e simulações computacionais que convergiram para proposição de indicadores de qualidade para instalações de aquecimento solar de grande porte. Tais indicadores, bem como a metodologia e as ferramentas para sua aplicação, estão consolidadas e prontas para serem aplicadas no circuito primário do sistema de aquecimento distrital a ser instalado no âmbito do Projeto CEMIG/ANEEL P&D 183.

Operacionalmente, as questões necessárias ao dimensionamento e avaliação do circuito secundário de um sistema de aquecimento distrital foram levadas em consideração na elaboração do algoritmo da versão final. Temperaturas, pressões e diâmetros são calculados de forma não otimizada e otimizada, possibilitando ao usuário uma modelagem integral e realística.

Capítulo 22

Capítulo 22: Otimização da Eficiência Elétrica de Módulos Fotovoltaicos Através do Acoplamento de Trocadores de Calor Tipo Tubo-Aleta[22]

***Resumo*- O acoplamento de módulos fotovoltaicos a coletores solares gera benefícios interessantes, como o aumento da eficiência elétrica do módulo fotovoltaico que passa a operar em temperaturas mais baixas gerando mais energia elétrica, além de gerar água quente a baixa temperatura, que pode ser utilizada para fins de aplicações sanitárias, como no banho. Também é possível obter um ganho no aproveitamento de área instalada, já que ambas as necessidades energéticas (calor e eletricidade) são produzidas em um único dispositivo, o que não poderia ser feito somente com um painel fotovoltaico iu um coletor solar plano tipo tubo aleta. Esse trabalho apresenta os resultados de simulações analíticas para avaliação do aumento da eficiência elétrica de módulos fotovoltaicos, quando acoplados a coletores solares planos do tipo tubo-aleta, para aquecimento de água distrital, um projeto resultante da parceria entre a Cemig, o Centro Universitário UNA e a FAPEMIG.**

22.1 Introdução

A junção de um módulo fotovoltaico com um coletor solar plano é tipicamente nomeada de PVT do inglês (Photovoltaic Thermal Collector). Consiste basicamente de um módulo fotovoltaico, funcionamento como superfície absorvedora, no qual se acopla um circuito hidráulico de um coletor solar plano, por onde circulará um fluido, usualmente a água, que terá a função de retirar o calor do módulo fotovoltaico. As principais vantagens do PVT são:

- A mesma área coberta por um PVT produzirá energia elétrica e térmica, economizando espaço nos telhados. Já que para obter esses resultados seria necessário dispor os dois dispositivos lado a lado, ocupando o dobro de área se ambos tiveram as mesmas dimensões, por exemplo.
- O PVT irá afetar de forma menos significativa a estética do telhado, quando comparado com a colocação de coletores solares planos e módulos fotovoltaicos lado a lado.
- A utilização do PVT poderá reduzir o custo de aquisição do sistema, já que normalmente faz-se a escolha entre uma das duas tecnologias de aproveitamento da energia solar.

[22] FERREIRA, A. G.; PEREIRA, E. M.; FARIA, L. P. P.; PROCÓPIO, O. L.; CALDEIRA, P.; MÁSSIMO, R.; DANIEL, A. C.; PORTO, M. A. D.; CORGOZINHO, I. M.; BARBOSA, J. M. C.. Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2015, Sauipe/Bahia

- Gera-se um aumento da eficiência elétrica dos módulos fotovoltaicos, que irão operar em temperaturas mais baixas. E sendo a energia elétrica mais nobre, a conexão desse sistema à rede da concessionária, por exemplo, pode gerar uma receita excedente.

Apesar dos benefícios do acoplamento das tecnologias de aquecimento solar em conjunto com a geração de energia elétrica fotovoltaica, a literatura a respeito desse tema ainda é restrita, tendo sido inicialmente desenvolvida entre o final dos anos 1970's e início de 1980's nos USA. Nove concepções de PVT são abordadas por H.A. Zondag [1], inclusive PVT que são compostos por coletores solares tipo tubo-aleta, um dos dois modelos que serão abordados nesse estudo.

H.A. Zondag [2], realizou um minucioso estudo da história do desenvolvimento do PVT fornecendo uma revisão dos últimos 30 anos de pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia, inclusive da elaboração de PVT's, onde o fluído de trabalho é o ar. T. T. Chow [3] também fornece uma revisão do estado da arte do PVT, focando nas tendências do desenvolvimento dessa tecnologia, principalmente nos últimos anos. Jin-Hee Kim [4] fez testes em campo com dois modelos de PVT, obtendo resultados satisfatórios da operação desses dispositivos e do aumento da eficiência elétrica dos módulos fotovoltaicos que compõem o PVT. A modelagem analítica e os resultados de quatro modelos de PVT, incluindo também os modelos que tem os coletores solares tipo tubo-aleta, como mecanismo de resfriamento das células fotovoltaicas são apresentados por Tripanagnostopoulos [9].

Experimentos comparativos da energia elétrica e térmica gerada antes e depois do acoplamento das células fotovoltaicas a coletores solares também foram verificados por Ivan Katic [5]. Nexte contexto, pretende-se explorar potencialidades em eficiência energética de forma a otimizar a produção de energia elétrica nos módulos fotovoltaicos e ainda utilizar o potencial térmico para pré-aquecimento de água, que será utilizada em uma comunidade.

Este estudo está sendo desenvolvido no âmbito do projeto de P&D 498 (Código Aneel: PD-495-0498/2012), intitulado "Desenvolvimento de solução PVT para aumento da eficiência de usinas solares", que além de gerar condições para a construção de um protótipo de PVT a partir da modelagem analítica de um PVT composto por um coletor solar tipo tubo-aleta, será construído uma usina de água quente.

Desta forma, os principais produtos do projeto serão o protótipo construído, as modelagens, o domínio tecnológico para aquecimento distrital, testes de desempenho comparando os módulos fotovoltaicos com e sem acoplamento do coletor e disseminação da tecnologia para a sociedade.

O projeto é uma parceria entre o Centro Universitário UNA, com o apoio financeiro da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Para o artigo houve

o apoio técnico do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

22.2 Desenvolvimento da pesquisa

A. O projeto P&D 498

Iniciado em 08 de abril de 2013, o projeto foi eleito entre os projetos submetidos ao Edital 11/2011 da FAPEMIG, através de um processo de julgamento, atendendo a vários requisitos de forma a suprir uma demanda do Setor Elétrico. A previsão de encerramento será em abril de 2015, mas devido a problemas no decorrer do projeto, houve a necessidade de adiamento desse prazo, que está em análise, alterando-o para o mesmo mês do ano de 2016.

Os benefícios esperados são diversos, pois além da otimização na utilização de energia elétrica, aumentando a eficiência na geração fotovoltaica e reduzindo a carga do sistema, há a possibilidade de um novo modelo de negócio na venda de água quente, capacitação de bolsistas, uso sustentável da energia, fornecimento de água quente para comunidades, reduzindo o consumo mensal de energia elétrica de várias famílias ou grupos de pessoas.

B. Metodologia

As metodologias que estão sendo adotadas são os experimentos em bancada, desenvolvimento *in loco* e estudo de caso. A equipe foi dividida em grupos, conforme a seguir:

Grupo 1: Focado no projeto da usina de água quente;

Grupo 2: Desenvolvimento do protótipo;

Grupo 3: Inserção da tecnologia na comunidade;

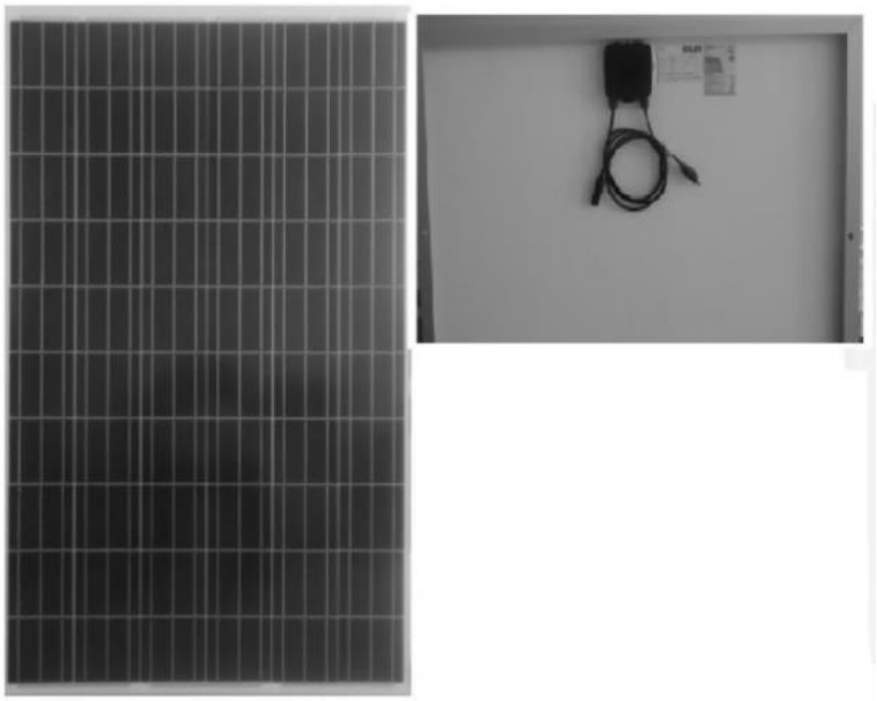
Grupo 4: Monitoramento e controle para validação dos modelos;

Grupo 5: Informática e Otimização para validação dos programas desenvolvidos.

O foco deste artigo concentrou-se no desenvolvimento do protótipo conforme será desenvolvido a seguir.

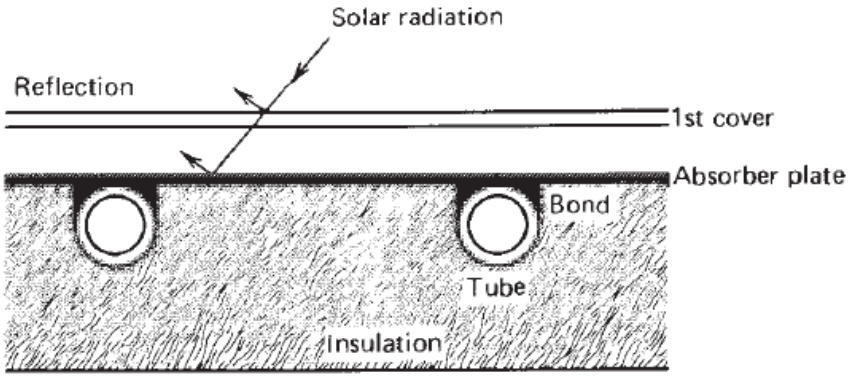
Optou-se por trabalhar com módulos fotovoltaicos opacos comerciais devido à facilidade em se obtê-los, os quais serão adquiridos desmontados sem o frame, ficando apenas as células encapsuladas, com sua cobertura de vidro na face superior e sua proteção isolante nas costas, o que permite fácil manuseio e também garante a integridade do circuito elétrico do módulo fotovoltaico. A Figura 1 apresenta um módulo fotovoltaico montado, semelhante ao que se pretende utilizar no protótipo.

Figura 1 – Módulo fotovoltaico.



O coletor solar do tipo tubo-aleta é o mais comum no Brasil, sendo fabricado pela maioria das empresas de aquecimento solar brasileiras, devido sua fácil confecção e baixas perdas de carga o que permite o funcionamento em termossifão (circulação natural) da água pelo coletor exposto ao sol. A Figura 2 apresenta um esquema desse tipo de coletor. Como forma de analisar os resultados foram feitas comparações das características elétricas esperadas de um módulo fotovoltaico e as publicadas no catálogo do fabricante, com os resultados das simulações após acoplamento do módulo fotovoltaico com o trocador de calor de um coletor solar plano do tipo tubo-aleta.

Figura 2 – Coletor Solar tipo Tubo-Aleta [6].



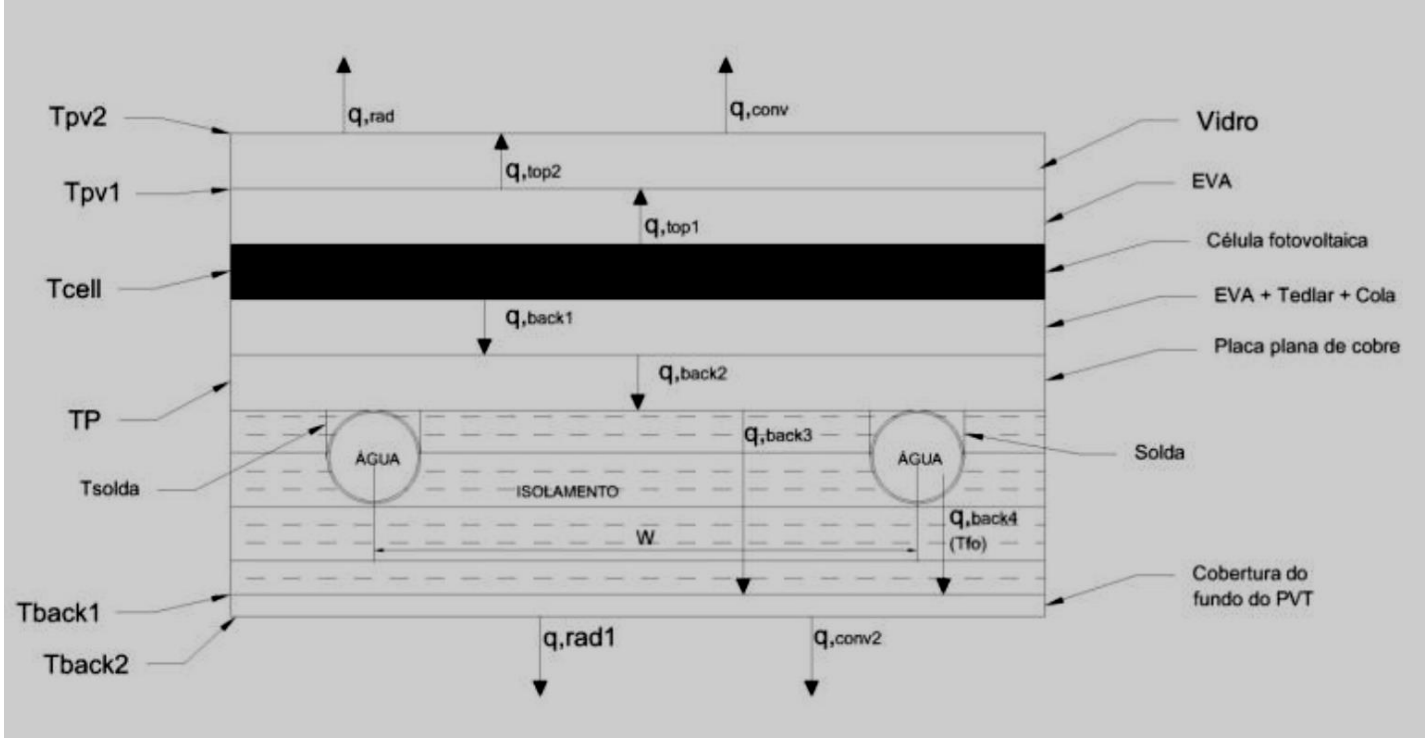
C. PVT Tubo-Aleta

A aplicação do modelo matemático elaborado por Duffie and Backman [6] para descrever um coletor solar plano tipo tubo-aleta é o ponto de partida para as simulações apresentadas nesse artigo, algumas modificações no modelo foram necessárias devido á inclusão do módulo fotovoltaico.

No coletor solar de placa plana tipo tubo-aleta descrito em [6], e apresentado na Figura 1, parte da radiação solar atravessa o vidro incidindo sobre a placa plana que está conectada a tubos verticais abaixo da mesma, por onde circula a água responsável por resfria-lá, de tal forma que todo o modelo matemático é construído pressupondo essa placa como o ponto com maior temperatura, sendo essa temperatura a principal variável a ser determinada. Com a inclusão das células fotovoltaicas, que deverão estar acima e sobre essa placa plana, o ponto de interesse passa a ser a temperatura média das células fotovoltaicas que constituem o módulo, que então passa a ser o ponto com maior temperatura do PVT.

Um módulo fotovoltaico opaco é constituído basicamente de Vidro/EVA/TiO/Si/EVA/PE-Altedlar [1], como mostrado na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Fluxo de Energia no PVT com base no modelo de distribuição de temperatura de Hottel Whillier.



$$q_{top,1} = q_{top,2} \quad (1)$$

$$q_{top,2} = q_{rad1} + q_{conv1} \quad (2)$$

$$q_{back1} = q_{back2} \quad (3)$$

$$q_{back3} + q_{water} = q_{rad2} + q_{conv2} \quad (4)$$

$$q_{rad2} + q_{conv2} = R_{back,t}(T_p - T_a) \quad (5)$$

Onde:

q: Fluxo de calor da célula para ambiente

R_{back}: Resistência térmica de condução através da base do PVT (K)

Na Figura 3 pode-se perceber os fluxos de energia que ocorrerão em função do aquecimento da célula fotovoltaica ao receber a radiação solar.

As equações para solucionar o balanço de energia representado pelas equações, (1), (2), (3), (4) e (5) com base no modelo de coletor solar plano tipo tubo-aleta [6] com as devidas modificações, são apresentadas a seguir, na forma que foram inseridas no *Software Engineering Equation Solver* – EES, para resolver a simulação. Optou-se trabalhar dessa forma, pois fica fácil a utilização do modelo aqui descrito pelo leitor para fazer suas próprias simulações e testar novas condições de operação do PVT.

D. Balanço

D.1. Perdas térmicas pelo topo

Com base na Figura 3 e tomando com ponto de partida a célula fotovoltaica, que é o ponto mais quente do PVT e já admitindo que acima da célula fotovoltaica haja uma camada de EVA e uma camada de vidro [1] podem ser descritas as seguintes equações para os fluxos de calor que ocorrem pelo topo do PVT.

$$q = \frac{k_{eva}(T_{cell} - T_{pv1})}{\delta_{eva}} \quad (6)$$

$$q = \frac{k_{vidro}(T_{pv1} - T_{pv2})}{\delta_{vidro}} \quad (7)$$

$$q = h_w(T_{PV2} - T_a) + h_{ras,cs}(T_{pv2} - T_s) \quad (8)$$

$$h_{rad,cs} = F_{top,ceu}\sigma E_c\left({T_{PV2}}^2 - {T_s}^2\right)(T_{pv2} - T_s) + F_{top,ground}\sigma E_{sup}\left({T_{PV2}}^2 - {T_s}^2\right)(T_{pv2} - T_s) \quad (9)$$

$$h_w = 2{,}8 + 3V_w \quad (10)$$

$$F_{top,ceu} = \frac{(1+\cos\beta)}{2} \quad (11)$$

$$F_{top,ground} = \frac{(1-\cos\beta)}{2} \quad (12)$$

$$q = U_t(T_{cell} - T_a) \quad (13)$$

Em que:

k_{eva}: Condutividade térmica do EVA (W/m K)
T_{cell}: Temperatura média da célula fotovoltaica (K)
T_{pv1}: Temperatura interna da cobertura de vidro do PVT(K)
T_{pv2}: Temperatura externa do vidro do PVT(K)
δ_{eva}: Espessura da cobertura de EVA do PVT (K)
δ_{vidro}: Espessura da cobertura do vidro do PVT (K)
h_w: Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e a camada de ar próxima[10] (W/m² K)
T_a: Temperatura ambiente (K)
$h_{ras,cs}$: Coeficiente de transferência de calor por radiaçao entre o vidro e o céu (W/m²K)
T_s: Temperatura do céu (K)
$F_{top,ceu}$: Fator que expressa o quanto do céu é visto pelo topo do coletor (-)[8]
E_c: Emissividade da cobertura de vidro(-)
$F_{top,ground}$: Fator que expressa o quanto do solo é visto pelo topo do coletor (-) [8]
U_t: Perdas térmicas pelo topo do PVT (W/m²K);

D.2. Perdas térmicas pelas costas

Os fluxos de energia pelas costas do PVT podem ser descritos pelas equações abaixo.

$$q_{back} = \frac{(T_{cell} - T_p)}{R_{back}} \quad (14)$$

$$R_{back} = R_{eva} + R_{tedlar} + R_{glue} \quad (15)$$

$$R_{eva} = \frac{\delta_{eva2}}{k_{eva}} \quad (16)$$

$$R_{tedlar} = \frac{\delta_{tedlar}}{k_{tedlar}} \quad (17)$$

$$R_{glue} = \frac{\delta_{glue}}{k_{glue}} \quad (18)$$

$$q_{back} = \frac{k_{isol,costas}}{\delta_{isol,costas}} (T_p - T_{back1}) \quad (19)$$

$$q_{back} = \frac{k_s}{\delta_s} (T_{back1} - T_{back2}) \quad (20)$$

$$q_{back} = h_{conv,total,back} (T_{back2} - T_a) + F_{back,ground} h_{rad,back,sup} (T_{back2} - T_{sup}) + F_{back,ceu} h_{rad,back,ceu} (T_{back2} - T_{sup}) \quad (21)$$

$$h_{conv,total,back} = \sqrt[3]{{h_{conv,back,f}}^3 + {h_{conv,back,n}}^3} \quad (22)$$

$$h_{conv,back,f} = \frac{k_{a2} N_{u2f}}{L_h} \quad (23)$$

$$h_{conv,back,n} = \frac{k_{a2} N_{u2n}}{L_h} \quad (24)$$

$$h_{rad,back,sup} = \sigma E_{back} ({T_{back2}}^2 + {T_{sup}}^2)(T_{back2} + T_{sup}) \quad (25)$$

$$h_{rad,back,ceu} = \sigma E_{back}({T_{back2}}^2 + {T_s}^2)(T_{back2} + T_s) \quad (26)$$

$$F_{back,ground} = \frac{(1+\cos\beta)}{2} \quad (27)$$

$$F_{back,ceu} = \frac{(1-\cos\beta)}{2} \quad (28)$$

$$q_{back} = U_b(T_{cell} - T_a) \quad (29)$$

Onde:

q_{back}: Fluxo de calor pelas costas do PVT (W/m²)

T_p: Temperatura da placa plana do coletor tubo-aleta (K)

R_{back}: Resistência térmica de condução através das costas do PVT (K)

R_{eva}: Resistência térmica de condução através da camada de EVA nas costas do PVT (K m²/W)

R_{tedlar}: Resistência térmica de condução através da camada de Tedlar nas costas do PVT (K m²/W)

R_{glue}: Resistência térmica de condução através da camada de material que une a placa plana metálica ao conjunto do módulo fotovoltaico do PVT (K m²/W)

δ_{eva2}: Espessura da camada de EVA que está abaixo das células fotovoltaicas do PVT (K m²/W)

δ_{tedlar}: Espessura da camada de Tedlar que está abaixo das células fotovoltaicas do PVT (m)

δ_{glue}: Espessura da camada de material que irá unir o conjunto do módulo fotovoltaico a placa plana (m)

k_{glue}: Condutividade térmica da camada de material que irá unir o conjunto do módulo fotovoltaico a placa plana (W/m-K)

$k_{isol,costas}$: Condutividade térmica da camada de isolamento térmico colocado nas costas do PVT (W/m-K)

$\delta_{isol,costas}$: Espessura da camada de isolamento térmico colocado nas costas do PVT (m)

T_{back1}: Temperatura interna da camada de fechamento das costas do PVT (K)

T_{back2}: Temperatura externa da camada de fechamento das costas do PVT (K)

T_{sup}: Temperatura da superfície do solo (K)

$F_{back,ground}$: Fator que expressa o quanto do solo é visto pelas costas do PVT (-)

$F_{back,ceu}$: Fator que expressa o quanto do céu é visto pelas costas do PVT (-)

$h_{conv,total,back}$: Coeficiente convectivo total de troca de calor entre as costas do PVT e o ar próximo (W/m² K)

σ :Constante de Stefan-Boltzman (W/m² K4)

$h_{conv,back,f}$: Coeficiente convectivo de troca de calor por escoamento forçado nas costas do coletor (W/m² K)

$h_{conv,back,n}$: Coeficiente convectivo de troca de calor por escoamento natural nas costas do coletor (W/m² K)

$h_{rad,back,sup}$: Coeficiente de troca de calor por radiação entre as costas do PVT e o solo (W/m² K)

$h_{rad,back,ceu}$: Coeficiente de troca de calor por radiação entre as costas do PVT e o céu (W/m² K)
k_{a2}: Condutividade do ar próximo as costas do coletor (W/m K)
N_{u2f}: Número de Nusselt para o escoamento forçado nas costas do coletor (-) [8]
N_{u2n} : Número de Nusselt para o escoamento forçado nas costas do coletor (-) [9].
L_h: Comprimento horizontal do PVT, considerando para incidência lateral de vento (m)
U_b: Coeficiente de global de perdas térmicas pelas costas do PVT (W/m² K)

D.3. Perdas térmicas pelas laterais e totais

Assim como em [6] as perdas de calor pelas laterais do PVT serão calculadas conforme as equações a seguir.

$$U_e = \frac{k_{isol,lat}}{\delta_{isol,lat}} \frac{A_{lat}}{A_c} \tag{30}$$

$$q_{lat} = U_e(T_{cell} - T_a) \tag{31}$$

$$q_{total} = U_L(T_{cell} - T_a) \tag{32}$$

$$U_L = U_t + U_b + U_e \tag{33}$$

Tem-se:

U_e: Coeficiente de perdas térmicas pela lateral do PVT (W/m²K)

$k_{isol,lat}$: Condutividade térmica do isolamento lateral do PVT (W/m K)

A_{lat}: Área lateral do PVT (m²)

A_c: Área superior externa do PVT, é a área por onde a radiação solar penetra no PVT (m²)

$\delta_{isol,lat}$: Espessura do isolamento lateral do PVT (m)

q_{lat}: Fluxo de calor pelas laterais do PVT (W/m²)

q_{total}: Fluxo das perdas de calor totais do PVT (W/m²)

U_L: Coeficiente de perdas totais de calor do PVT (W/m² K)

D.4. Fluxo de calor da placa plana para os tubos verticais do PVT

$$F = \frac{\tanh\frac{m(W-D_{te})}{2}}{\frac{m(W-D_{te})}{2}} \tag{34}$$

$$m = \sqrt[2]{\frac{U_L}{\delta_{aleta} k_{aleta}}} \tag{35}$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W[\frac{1}{U_L(D_{te}+(W-D_{te})F)}+\frac{1}{h_{conv,f}\pi D_{te}}+\frac{1}{C_b}]} \quad (36)$$

$$W = \frac{L_h}{n} \quad (37)$$

$$h_{conv,f} = \frac{k_{wa}N_{u4}}{D_{te}} \quad (38)$$

$$\frac{T_{fo}-T_a-\frac{S_1}{U_L}}{T_{fi}-T_a-\frac{S_1}{U_L}} = exp\frac{U_L A_c F\prime}{\dot{m}Cp_w} \quad (39)$$

Em que:

F: Fator de eficiência da aleta retangular (-) [6]

m: Variável defina para facilitar as demonstrações matemáticas do modelo de coletor plano (-)[6]

F′ : Fator de eficiência do coletor (-) [6]

C_b: Condutância do material que liga o tubo a placa plana (W/mK)

W: Distância existente entre aleta e o centro dos tubos verticais do PVT (m)

n: Quantidade de tubos verticais do PVT (-)

$h_{conv,f}$: Coeficiente convectivo de transferência de calor para o escoamento de água pelos tubos verticais do PVT (W/m²K)

k_{wa}: Condutividade térmica da água dentro dos tubos verticais do PVT (W/m K)

N_{u4}: Número de Nusselt para o escoamento de água dentro dos tubos verticais do PVT (-) [8]

D_{te}: Diâmetro externo dos tubos verticais do PVT (m)

T_{fo}: Temperatura de saída da água após passar pelos tubos verticais do PVT (K)

T_{fi}: Temperatura de entrada de água nos tubos PVT (K)

S: Energia térmica disponível para ser transferida para a água no interior dos tubos, após descontado a energia elétrica gerada [1] (W/m²)

$\dot{m}$: Vazão mássica de água pelos tubos verticais do PVT (kg/s)

C_{pw}: Calor específico da água dentro dos tubos verticais do PVT, calculado na temperatura média do fluido dentro dos tubos verticais - T_{fm} (kJ/kg K)

D.5. Fator de remoção de calor do Coletor e Fator de fluxo

$$F_R = \frac{\dot{m}Cp_{wa}}{A_c U_L}[1 - exp\frac{-A_c F' U_L}{\dot{m}Cp_{wa}}] \quad (40)$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \tag{41}$$

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{\frac{Q_u}{A_c}(1-F')}{F_R U_L} \tag{42}$$

$$Q_u = A_c(S - U_L(T_p - T_a)) \tag{43}$$

$$T_p = T_{fi} + \frac{\frac{Q_u}{A_c}(1-F_R)}{F_R U_L} \tag{44}$$

$$S = I_T \tau\alpha_{eff} \tag{45}$$

$$\tau\alpha_{eff} = \tau\alpha - \tau_{pv}\eta_{el} \tag{46}$$

Onde as variáveis representam:

F_R: Fator de remoção de calor do circuito hidráulico do PVT (-)

F'': Fator de Fluxo do PVT, para maiores detalhes ver Duffie and Backaman[6] (-)

T_{fm}: Temperatura média da água escoando pelos tubos verticais do PVT, para maiores detalhes ver Duffie anda Backman [6] (K)

Q_u: Quantidade de energia realmente transferida para água escoando pelos tubos verticais do PVT (W)

T_p: Temperatura média da placa plana acoplada nos módulos fotovoltaico (K)

$\tau\alpha_{eff}$: Coeficiente de Trasmissividade-absortividade para o modelamento térmico, descontada à geração de energia elétrica pelas células fotovoltaicas. Para maiores detalhes veja H.A. Zondag (-) [1].

$\tau\alpha$: Coeficiente de Trasmissividade-absortividade do módulo fotovoltaico. Para maiores detalhes veja H.A. Zondag (-) [1].

τ_{pv}: Coeficiente de Trasmissividade-absortividade para camadas que possam existir acima das células fotovoltaicas. Para maiores detalhes veja H.A. Zondag (-) [1].

η_{el}: Eficiência elétrica do PVT (-).

D.6. Eficiência Elétrica e Térmica

O desempenho elétrico e térmico do módulo fotovoltaico pode ser modelado com base nas seguintes equações:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{I_T A_c} \tag{47}$$

$$P_{el} = P_o\left(\frac{I_T}{I_{ref}}\left(1 - \gamma_T\left(T_{cell} - T_{ref}\right)\right)\right) \quad (48)$$

$$\eta_t = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (49)$$

Em que:

P_{el}: Potencia elétrica do PVT (W) [8];

γ_T: Coeficiente de temperatura para a máxima potência do módulo fotovoltaico nas condições padrões de teste (C-1)

T_{ref}: Temperatura de referência das células fotovoltaicas para nas condições padrões de teste, igual a 25° (Standard Test Conditions – 1000 W/m², air mass AM de 1,5).

E. Dados para Simulação Analítica

O PVT a ser simulado pode ser representado, conforme a Figura 4 a seguir, que demonstra uma vista explodida do modelo proposto. Para que sejam feitas as devidas análises do desempenho elétrico e térmico do PVT, é necessário que se determine as condições de operação e as características dimensionais do PVT desejado. Assim, utilizaram-se os dados do módulo fotovoltaico, modelo KD245GH-4FB do fabricante Kyocera conforme a tabela I, e também a tabela II que apresenta as condições de simulação adotada e demais características do PVT que devem fazer parte da simulação analítica apresentada nesse trabalho, com base no modelo matemático de PVT elaborado.

Tabela I – Características do módulo Fotovoltaico.

Dados do Fabricante	
Modelo	KD245GH-4FB
Fabricante	KYOCERA
Material das células	Multi-cristalino
Condições Padrão de Operação - STC	
Potência máxima	245 W
Tensão de máxima potência (Vmp)	29,8 V
Corrente máxima de potência (Imp)	8,23 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	36,90 V
Corrente de curto circuito (Isc)	8,91 A
Eficiência	14,80%
Condições Normais de Operação - NOCT	
Máxima potência	175 W
Tensão de máxima potência (Vmp)	26,80 V
Corrente de máxima potência (Imp)	6,58 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	33,70 V
Corrente de curto circuito (Isc)	7,21 A
Temperatura de operação (Tnoct)	45ºC
Outras Características Elétricas	
Coeficiente de temperatura para tensão Voc	-0,36%/ºC
Coeficiente de temperatura para corrente Isc	0,06%/ºC
Coeficiente de temperatura para a máxima potência	-0,46%/ºC
Dimensões	
Comprimento	1662 mm
Largura	990 mm
Espessura do conjunto	46 mm

Figura 4 – Vista explodida do PVT simulado.

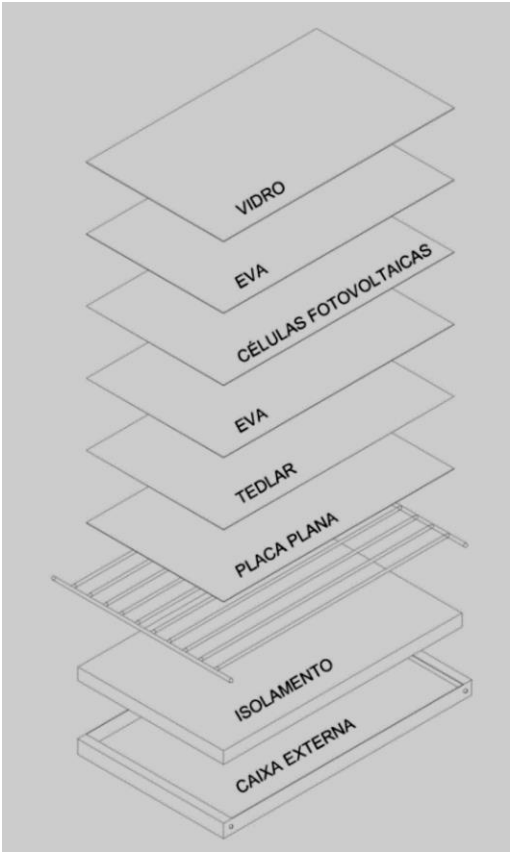


Tabela II – Dados de simulação e características construtivas do PVT.

Características construtivas do PVT	
Largura	0,99 m
Comprimento	1,662 m
Área coletora	1,65 m²
Espessura total do PVT	0,05 m
Espessura do vidro	0,0030 m
Espessura do EVA sobre a célula	0,00050 m
Espessura do EVA abaixo da célula	0,00050 m
Espessura do Tedlar	0,00010 m
Espessura da cola	0,000050 m
Espessura da placa plana	0,00060 m
Espessura do isolamento das costas	0,045 m
Espessura do isolamento lateral	0,02250 m
Espessura do fechamento das costas	0,0010 m
Condutividade do vidro	1,40 W/m-K
Condutividade do EVA	0,35 W/m-K
Condutividade do Tedlar	0,20 W/m-K
Condutividade da cola	0,85 W/m-K
Condutividade da placa plana	237,00 W/m-K
Condutividade dos isolamentos do PVT	0,04 W/m-K
Condutância da solda	500,00 W/m-K
Coeficiente convectivo nos tubos verticais	262,5 W/m²-K
Diâmetro do manifold	0,022 m
Diâmetro dos tubos verticais	0,01 m
Número de tubos	10
Inclinação	30 °
Radiação solar incidente	1000 W/m²
Vazão mássica total	0,02 kg/s
Temperatura da água ao entrar	25 °C
Velocidade do vento	1 m/s

22.3 Resultados

O Gráfico I apresenta as curvas das equações linearizadas de desempenho elétrico e térmico do PVT, para as condições de radiação solar e temperatura ambiente, fixas apresentada na Tabela II. Variando-se a temperatura da água que entra no PVT, pode ser observado que a eficiência térmica é mais sensível a essa mudança na temperatura do que a eficiência elétrica. A tabela III a seguir, utilizada para gerar o gráfico I, permite uma melhor visualização da influência da temperatura da água de entrada do PVT em suas eficiências térmicas elétricas.

Gráfico I – Eficiência Térmica e Elétrica do PVT.

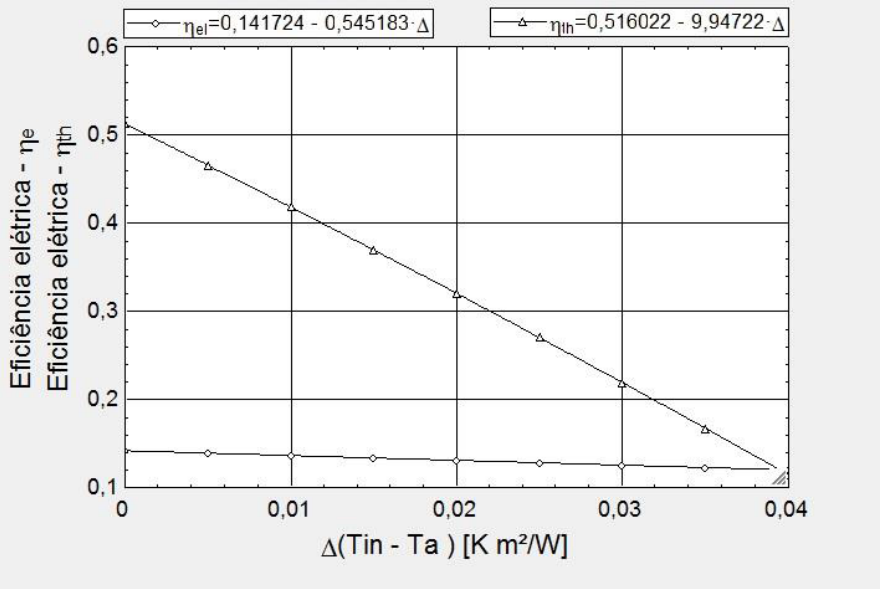


Tabela III – Desempenho Elétrico e Térmico do PVT nas condições padrões de operação do módulo.

$\eta_{elétrica}$	$\eta_{térmica}$	T_{fi} (K)	P_{el} (W)	$\frac{T_{fi}-T_a}{G}$ (K m²/W)
0,1417	0,5121	298,00	233,20	0,00
0,139	0,4653	303,00	228,70	0,01
0,1363	0,4177	308,00	224,20	0,01
0,1335	0,3692	313,00	219,70	0,02
0,1308	0,3199	318,00	215,20	0,02
0,1281	0,2697	323,00	210,80	0,03
0,1254	0,2187	328,00	206,30	0,03
0,1226	0,1669	333,00	201,8	0,04
0,1199	0,1142	338,00	197,30	0,04

Nota-se, que a circulação de água no módulo fotovoltaico que opera nas condições padrões de teste – STC permite o módulo operar com o fornecimento de potência elétrica de até 192,8 W no pior dos casos, onde a temperatura da água que entra no PVT é de 71,2 ºC. Estando essa potência inclusive acima da potência fornecida nas condições normais de teste operacional - NOCT do módulo fotovoltaico em estudo.

Entretanto, no caso do módulo operando nas condições normais de teste operacional – NOCT, onde se espera uma produção de 176 W e temperatura da célula de

45º (318 K). O PVT produziria até 192 W, ou seja, 9,1% mais energia elétrica, conforme pode ser observado na tabela IV, na qual todas as condições de simulação expressas na tabela II se mantiveram, exceto a radiação solar incidente, que passa a ser de 800 W/m².

Tabela IV – Desempenho elétrico e térmico do PVT nas condições normais de operação do módulo.

$\eta_{elétrica}$	$\eta_{térmica}$	T_{fi} (K)	P_{el} (W)	$\frac{T_{fi}-T_a}{G}$ (K m²/W)
0,1466	0,5098	293,00	192,90	0,00
0,1438	0,4523	298,00	189,30	0,01
0,1411	0,3938	303,00	185,70	0,01
0,1383	0,3342	308,00	182,10	0,02
0,1356	0,2735	313,00	178,50	0,03
0,1329	0,2119	318,00	174,90	0,03

O PVT operaria com uma potência de até 192 W, ou seja, 9,1 % mais produção de energia elétrica, enquanto a água estivesse mais fria do que a célula. Observa-se também que ao contrário do que ocorreu para as simulações nas condições padrões de teste, nas mesmas temperaturas de entrada há uma diferença na potência gerada, já que o valor da radiação solar incidente é menor do caso das condições normais de teste operacional.

Se funcionando como um sistema de aquecimento solar convencional com um reservatório de acumulação. Enquanto a água do reservatório estivesse com temperatura inferior à temperatura do módulo e próximo da temperatura ambiente, o PVT poderia operar com uma boa eficiência térmica, gerando mais energia elétrica do que o que ocorreria em um módulo fotovoltaico operando nas mesmas condições climáticas.

22.4 Conclusão

As simulações apresentadas para o desenvolvimento do PVT demonstram que existe uma vantagem inerente no acoplamento do trocador de calor de um coletor solar tipo tubo aleta a um módulo fotovoltaico, que como pode ser percebida é o aumento da eficiência elétrica do módulo. Entretanto, isso somente ocorre para a situação em que a temperatura da água que entra no PVT não seja mais elevada do que a temperatura das células, caso contrário um aquecimento seria provocado e um efeito diverso ao proposto na construção do PVT seria obtido. Portanto, constata-se, a necessidade de sistemas de controle específicos que deverão impedir a circulação de água no PVT, caso as células do PVT estejam mais frias do que a agua armazenada por exemplo.

É importante ressaltar, que a eficiência elétrica e térmica do PVT poderia ser aumentada, aumentando-se a vazão de água pelos mesmos, pois isso iria impactar

diretamente no coeficiente de troca de calor convectivo da água escoando nos tubos verticais, que esta retirando o calor das placa plana na qual as células estão conectadas. Isso ocorre, porque provavelmente o escoamento tende a se tornar turbulento, e as trocas de calor seriam então favorecidas, já que o número de Nusselt do escoamento aumentaria [7]. Contudo, isso aumentaria as perdas de carga do escoamento, necessitando de potência de bombas cada vez maiores, o que poderia consumir mais energia do que o que seria gerado, sendo necessário que se defina um ponto mais adequado de operação.

É muito importante, que pesquisas experimentais também sejam elaboradas, visando à construção do PVT aqui estudado, para que dados reais de seu funcionamento possam ser obtidos e aperfeiçoamentos e técnicas de utilização específicas do produto sejam alcançados, de forma a difundir o seu uso em escala comercial.

Espera-se que com o desenvolvimento da tecnologia, usinas de água quente que poderão ser instaladas em comunidades e condomínios, aumentando a eficiência na produção de energia elétrica proveniente da fonte solar.

O projeto encontra-se no final do primeiro ano de desenvolvimento, fase em que os protótipos serão construídos, aguardando trâmites internos das parceiras na liberação dos recursos necessários para tal.

Capítulo 23

Capítulo 23: Sistema Frigorífico Por Absorção de Vapor Acionado Por Energia Solar[23]

***Resumo*- Uma das formas para contribuir com o aumento da qualidade de vida e produtividade de comunidades rurais é garantir-lhes o acesso a sistemas que permitam o armazenamento adequado da sua produção até o momento da venda, ou mesmo o processamento desta produção, de forma que se agregue valor aos produtos vendidos. Neste sentido, os sistemas de refrigeração por absorção de vapor heliotérmicos podem ser uma alternativa, pois possuem baixo, ou nenhum, consumo de energia elétrica. Mesmo que a eletricidade logo esteja disponível para estas comunidades isoladas, a baixa renda de seus moradores pode não suportar o custo final da energia elétrica. Assim, neste trabalho avalia-se a possibilidade de utilização de sistemas de refrigeração por absorção de vapor, acionados por energia solar, para o suprimento das necessidades de "frio" de comunidades rurais. Os resultados indicam que a tecnologia de geração distribuída pode ser promissora no atendimento de necessidades sociais.**

23.1 Introdução

Segundo Nogueira [1] as áreas rurais raramente recebem a atenção que merecem. Este autor frisa que a utilização local e integrada de fontes de energias renováveis oferece as melhores oportunidades para a energização de áreas rurais isoladas de países em desenvolvimento. Enumera ainda algumas vantagens dessa utilização como: melhoria geral na qualidade de vida, criação de novos postos de trabalho, diminuição do êxodo rural, autossuficiência energética, preservação do meio ambiente devido à diminuição do uso de combustíveis fósseis, e o desenvolvimento e crescimento econômico para aproximadamente dois bilhões de pessoas no mundo (cerca de 30% da população atual).

No Brasil, a eletrificação na zona rural vem sendo um problema há muitos anos. Ainda hoje, milhares de famílias não usufruem do benefício da energia elétrica em propriedades rurais, sobretudo em comunidades isoladas. Em que pese todo o esforço governamental realizado através de programas de governo e atuação de políticas públicas. Neste sentido faz-se necessário citar o Programa Luz para Todos. Este programa teve a sua execução entre os anos de 2003-2011, tendo um investimento aproximado de R$22 bilhões e atendendo a mais de 15 milhões de moradores rurais em todo o país [2]. Entretanto cabe ressaltar que tecnologias diretas para produção de frio, até mesmo por sua indisponibilidade comercial, não se encontram elencadas dentre as possíveis tecnologias de atendimento por este programa.

[23] VENTURINI, O. J. ; PIRANI, M. J. ; MENDES, T. ; SILVA, E. L. B. ; SILVA, C. H. F. .. Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2015, Costa do Sauipe/Bahia.

No momento, o programa governamental que tem se preocupado com a ampliação de acesso a energia elétrica e inclusão das comunidades isoladas é o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica.

Segundo o BEN [3], de todo o consumo de energia no Brasil, o setor agropecuário respondeu por 4,1% em 2013 com participações de 55,2% de óleo diesel, 24,8% de lenha e 20,0% de outras fontes (que inclui gás natural, eletricidade GLP, álcool etílico e óleo combustível). Nota-se então a baixa diversidade da matriz energética no setor agropecuário e a pequena participação da energia elétrica, que em geral é utilizada apenas para iluminação, sendo que em várias localidades esta fonte ainda não está disponível. Também devido a essa pequena demanda de eletricidade, e à longa distância comumente encontrada entre as propriedades rurais e as redes de distribuição de energia elétrica, geralmente a eletrificação na zona rural é bastante dispendiosa.

O setor agrícola brasileiro tem apresentando sucessivos recordes de safras, destacando-se como um dos mais importantes setores da economia nacional. Em contrapartida, o Brasil tem se destacado também pelas perdas pós-colheita e desperdícios. No caso de frutas e hortaliças, estudos realizados constatam que no Brasil os níveis médios de perdas pós-colheita são de aproximadamente 30% [4]. Uma parte desta perda poderia ser minimizada caso houvesse disponibilidade de tecnologia para refrigeração a baixo custo.

Recentemente, inúmeros trabalhos vêm sendo desenvolvidos para avaliar a viabilidade da utilização de sistemas de refrigeração por absorção no meio rural, seja utilizando calor residual de centrais diesel, queima de biomassa ou aproveitamento da energia solar por meio de coletores, bombas de calor, dentre outras opções. Além da atual preocupação com os recursos energéticos, estes sistemas visam melhorar as condições de vida de pequenos produtores rurais, agregando valor a seus produtos, reduzindo o desperdício por falta de refrigeração e munindo-os com tecnologia para se manterem em um mercado cada vez mais exigente quanto à qualidade e procedência das mercadorias.

São várias as configurações dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor acionados por energia solar, e a otimização dos custos e formas de operação, a fim manter a sua capacidade durante os períodos com ausência ou baixas taxas de radiação, é um dos principais enfoques das pesquisas atuais ([5]-[7]).

TR é a abreviatura para tonelada de refrigeração e é definida como a potência de refrigeração sendo a medida da quantidade que pode congelar 900 kg de água em 24 horas.

Segundo Sales et al. [8], os custos específicos de implantação dos sistemas de refrigeração por absorção acionados por energia solar são de USD 5100/kWt (USD 17000/TR) contra USD 250/kW (USD 800/TR) dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor (kWt: potência térmica). Em se tratando de comunidades isoladas e considerando um custo de implantação de USD 1500/km para redes de

transmissão rurais, os sistemas de absorção podem se tornar atrativos a partir de 3,5 km dos centros urbanos.

Considerando este cenário, o objetivo fundamental do projeto "D273 - Desenvolvimento de Sistema Frigorífico Por Absorção de Vapor, Acionado Por Energia Solar, Para Aplicação em Comunidades Rurais" (CEMIG) (Código Aneel: 4950-031/2007) foi o desenvolvimento de um sistema de refrigeração por absorção de vapor, com capacidade de 10 kWt (3,0 TR), acionado por energia solar. Também podem ser citados como objetivos secundários os seguintes tópicos: (i) levantamento das necessidades de frio de comunidades rurais; (ii) modelagem computacional do comportamento do sistema refrigeração por absorção, integrado aos coletores solares; e (iii) desenvolvimento de uma ferramenta capaz de efetuar a análise técnico-econômica de sistemas de refrigeração por absorção de vapor, do tipo H2O/NH3, acionado por energia solar.

Como principais resultados do projeto, podem ser citados:

i) Desenvolveu-se um modelo matemático (ferramenta computacional) em linguagem MatLab capaz de simular o comportamento de sistemas de refrigeração por absorção de vapor do tipo água-amônia, operando tanto em carga nominal quanto em carga parcial. Também se utilizou o Método do Custo do Ciclo de Vida para efetuar uma análise econômica do mesmo, utilizando exclusivamente energia solar como fonte térmica.

ii) Efetuou-se o projeto executivo de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de 10 kWt de capacidade, isto é, 3,0 TR (toneladas de refrigeração), e acionado por energia solar, cujos desenhos construtivos e especificações técnicas permitem a construção de unidades de refrigeração deste tipo.

iii) Construiu-se um protótipo de um sistema de refrigeração por absorção de vapor, de acordo com o projeto desenvolvido. No entanto, por restrições de espaço, tanto do laboratório de Refrigeração da UNIFEI, quanto da sua cobertura (são cerca de 70 m² de coletores solares), não foi possível realizar os testes experimentais de longa duração. Porém foram realizados testes preliminares e estanqueidade, numa instalação montada temporariamente no laboratório. Ressalta-se ainda que atualmente encontra-se em construção na UNIFEI, em área cedida pela atual reitoria, e financiado pelo projeto "Avaliação Teórica Experimental de equipamentos de Geração de Energia Heliotérmica: Solar Dish e ORC" (CNPq), um laboratório para estudos de sistemas de aproveitamento de energia heliotérmica. Neste laboratório já foi feita uma reserva de área para a instalação do protótipo construído no âmbito deste projeto, para que os testes finais sejam executados e novas pesquisas sejam executadas.

Assim, apresenta-se neste trabalho uma análise do comportamento de um sistema de refrigeração por absorção de vapor, acionado por energia solar, para produção de "frio" em comunidades rurais.

23.2 Desenvolvimento da Pesquisa

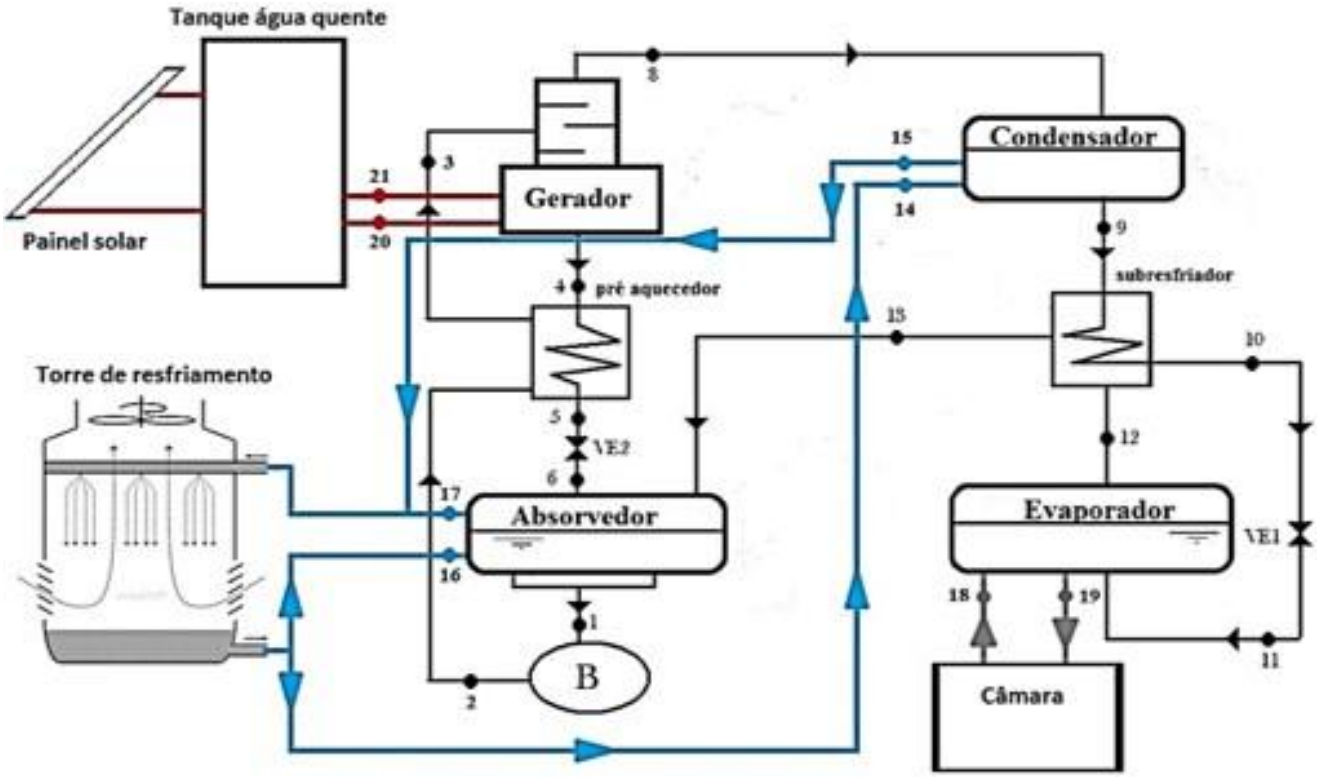
A seguir será apresentado o equacionamento utilizado para a modelagem matemática do sistema de refrigeração por absorção de vapor, do tipo água-amônia, que permite simular o seu funcionamento tanto em carga nominal quanto em carga parcial.

A modelagem matemática do sistema de refrigeração por absorção apresentada neste trabalho faz uso dos princípios de conservação de massa (Equação da Continuidade) e de energia (Primeira Lei da Termodinâmica), equações de estado para o cálculo das propriedades termodinâmicas da solução de água-amônia (H2O/NH3), assim como equações de transporte e as que regem os fenômenos de transferência de calor e massa em cada componente do sistema.

Para a obtenção das propriedades termodinâmicas da solução de água e amônia (fluido de trabalho) foram utilizadas as equações de estado propostas por [9]-[10]. Tais equações de estado visam calcular a temperatura, entalpia e volume específico da solução de água e amônia, a partir de valores de concentração, pressão e/ou temperatura.

Existem várias configurações disponíveis para os sistemas de refrigeração por absorção de vapor, cada qual atendendo uma finalidade específica. Considerando a hipótese de utilização de energia solar para acionamento do sistema de refrigeração e temperatura do ambiente (ou meio) refrigerado entre -5 e 0 ºC, o modelo aqui apresentado deve reproduzir basicamente um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito, sendo composto por um evaporador, um condensador, um absorvedor, um gerador, um subresfriador, um superaquecedor, uma bomba de solução e válvulas redutoras de pressão. Esta configuração se assemelha a proposta por [10]-[12], cuja representação esquemática é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática do sistema de refrigeração por absorção de vapor.



Para o acionamento do sistema, um tanque de termoacumulação, assim como coletores solares térmicos foram conectados ao gerador, pois tais elementos serão os responsáveis por fornecer a energia para acionamento do sistema.

Para a elaboração deste modelo foram consideradas algumas hipóteses simplificadoras que visam facilitar a modelagem matemática, entretanto sem perder a representatividade do equipamento ao qual se aplicam. As hipóteses consideradas no desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho, que são também utilizados por outros autores ([13]-[14]), são:

- Sistema opera em regime permanente;
- A pressão no condensador (P_H) é igual à do gerador, e a pressão no absorvedor é igual à do evaporador (P_L).
- As mudanças de pressões ocorrem apenas nas válvulas de expansão e bombas, e não há perdas de pressão ao longo das tubulações de conexão de componentes do sistema;
- As variações de energia potencial e cinética podem ser desprezadas;
- As soluções de refrigerante que deixam o condensador e o evaporador estão no estado de líquido saturado e vapor saturado, respectivamente;
- A solução forte que deixa o absorvedor e a solução refrigerante que deixa o gerador estão no estado de líquido saturado e vapor saturado respectivamente;
- A solução fraca que deixa o gerador está no estado de líquido saturado;
- Não há alteração na concentração das soluções fortes, fracas e de refrigerante ao longo das linhas de conexão;
- O tanque de termoacumulação não apresenta estratificação de temperatura (há mistura completa da água dentro do recipiente térmico);
- Os coletores solares trabalham sob temperatura operacional máxima.

O ponto de partida da modelagem está baseado no estabelecimento de condições iniciais de funcionamento (parâmetros de entrada), que representam o sistema de refrigeração na sua condição nominal, as quais são: capacidade frigorífica para condição nominal (Q_o); concentração de amônia na saída do gerador (x_r); temperatura de entrada e de saída da água do gerador; temperatura de entrada e saída da água do evaporador; temperatura de entrada e saída da água do absorvedor; temperatura de entrada e saída da água do condensador; diferencial (*approach*) entre a temperatura da água de saída do gerador e a temperatura do gerador (ΔTg); diferen-cial (*approach*) entre a temperatura da água de saída do absorvedor e a temperatura de absorção (ΔTa); diferencial (*approach*) entre a temperatura da água de saída condensador e a temperatura de condensação (ΔTc); diferencial (*approach*) entre a temperatura da água de saída do evaporador e a temperatura de evaporação (ΔTe); efetividade do pré-aquecedor (ε_1) e efetividade do subresfriador (ε_2);

Com base nos dados de entrada e nas hipóteses simplificadoras apresentadas anteriormente, descreve-se a seguir o equacionamento matemático utilizado para a modelagem de cada componente do sistema.

Nas equações apresentadas a seguir, os sub índices numéricos que aparecem nas propriedades termodinâmicas (temperatura, pressão, volume específico, entalpia, etc.) se referem ao ponto (estado) apresentado na Figura 1.

A. Bomba de solução

Este equipamento tem por finalidade promover a circulação de solução forte que deixa o absorvedor, e segue em direção ao gerador de vapor, aumentando a sua pressão. O trabalho consumido pela bomba de solução (W_p) é dado por (1), onde υ é o volume específico da solução e m_s é a massa da solução, dado por [10].

$$\dot{W}_p = m_s(P_H - P_L)\upsilon \tag{1}$$

B. Subresfriador e Pré-aquecedor

Estes equipamentos (subresfriador e pré-aquecedor) têm por objetivo otimizar as trocas de energia entre os componentes do sistema, visando reduzir a quantidade de energia necessária no gerador e, consequentemente, aumentar a eficiência global do sistema. De posse das efetividades dos trocadores de calor (subresfriador e pré-aquecedor), são determinadas as temperaturas de líquido subresfriado (ponto 5 e 10 da Figura 1) através de (2) e (3), onde (Q_{pa}) corresponde ao calor trocado no pré-aquecedor, ($Q_{pa,max}$) ao máximo calor trocado no pré-aquecedor, (Q_{sb}) corresponde ao calor trocado no subrespriador, ($Q_{sb,max}$) ao máximo calor trocado no subresfriador, T é a temperatura.

$$\varepsilon_1 = \frac{\dot{Q}_{pa}}{\dot{Q}_{pa,max}} \quad \Rightarrow \quad T_5 = T_4 - \varepsilon_1 (T_4 - T_2) \tag{2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\dot{Q}_{sb}}{\dot{Q}_{sb,max}} \quad \Rightarrow \quad T_{10} = T_9 - \varepsilon_2 (T_9 - T_{12}) \tag{3}$$

C. Dispositivo de Expansão

Este elemento tem por objetivo promover uma redução na pressão do fluido de trabalho do sistema, acarretando também em uma redução de temperatura. Realizando-se um balanço de massa e energia no volume de controle formado pelo próprio dispositivo de expansão obtém-se (4)-(5), sendo h a entalpia nos pontos indicados conforme a Figura 1.

$$h_6 = h_5 \tag{4}$$

$$h_{10} = h_{11} \tag{5}$$

D. Evaporador

O evaporador é o equipamento responsável por remover o calor proveniente da carga (produto) que se deseja resfriar. Realizando um balanço de massa e energia no evaporador pode-se calcular a vazão mássica refrigerante (m_f) em circulação pelo sistema (6).

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}_o}{h_{12} - h_{11}} \tag{6}$$

Pelas hipóteses simplificadoras apresentadas, pode-se concluir que a vazão de refringente é igual a vazão nos pontos 8 a 13:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \tag{7}$$

Para o cálculo da transferência de calor pelo evaporador utiliza-se o produto da sua área de troca térmica (A_o) pela condutância global (U_o) e, para o cálculo da diferença de temperatura média logarítmica ($\Delta T_{ml,o}$) (9) considera-se que o mesmo opera em contracorrente. Assim, tem-se:

$$\dot{Q}_o = U_o A_o \Delta T_{ml,o} \tag{8}$$

$$\Delta T_{ml,o} = \frac{(T_{18} - T_{12}) - (T_{19} - T_{11})}{ln\left(\frac{T_{18} - T_{12}}{T_{19} - T_{11}}\right)} \tag{9}$$

E. Condensador

A função deste equipamento é rejeitar a energia absorvida pelo fluido de trabalho no gerador e na bomba, promovendo a sua condensação. Um balanço de massa e energia no condensador fornece a sua capacidade (Qc):

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_f (h_8 - h_9) \tag{10}$$

Da mesma forma que no evaporador, o fluxo de calor através do condensador é dado por (11), onde A_c é a sua área de troca térmica, U_c é a sua condutância global, e $\Delta T_{ml,c}$. a diferença de temperatura média logarítmica no mesmo.

$$\dot{Q}_c = U_c \, A_c \, \Delta T_{ml,c} \tag{11}$$

$$\Delta T_{ml,c} = \frac{(T_9 - T_{15}) - (T_9 - T_{14})}{ln\left(\frac{T_9 - T_{15}}{T_9 - T_{14}}\right)} \tag{12}$$

F. Absorvedor

Este equipamento é responsável por promover a absorção do vapor de fluido refrigerante que deixa o evaporador pela solução fraca, num processo de transferência simultânea de calor e massa, o que exige a rejeição de calor para o meio ambiente. Realizando um balanço de massa e energia no absorvedor pode-se calcular as va-

zões mássicas de solução forte (m_s) e fraca (m_w), por (13) e (14), respectivamente, sendo que x representa a concentração de amônia na solução, para o ponto considerado (Figura 1).

$$\dot{m}_w = \dot{m}_f \frac{(x_r - x_s)}{(x_s - x_w)} \tag{13}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_f + \dot{m}_w \tag{14}$$

Das hipóteses simplificadoras:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \tag{15}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \tag{16}$$

O calor rejeitado no absorvedor (Qa) pode ser calculado por:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_1 h_1 \tag{17}$$

Do ponto de vista da transferência de calor, o calor rejeitado no absorvedor pode ser calculado por (18), onde *Aa* é a área de troca térmica, U_d é a condutância global, e $\Delta T_{ml,a}$. diferença de temperatura média logarítmica no mesmo.

$$\dot{Q}_a = U_a A_a \Delta T_{ml,a} \tag{18}$$

$$\Delta T_{ml,a} = \frac{(T_6 - T_{17}) - (T_1 - T_{16})}{ln\left(\frac{T_6 - T_{17}}{T_1 - T_{16}}\right)} \tag{19}$$

G. Gerador

Este elemento é responsável por transferir a energia térmica proveniente da fonte quente (coletores solares) para o fluido de trabalho, promovendo a liberação do refrigerante (amônia) da solução forte. Deste modo, este é o elemento que promove o acionamento do sistema de refrigeração por absorção de vapor. Realizando um balanço de massa e energia no gerador obtém-se o calor fornecido (Q_g), por (20):

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \tag{20}$$

O dimensionamento do gerador pode ser feito por (21), onde A_g é a área de troca térmica, U_g é a condutância global, e $\Delta T_{ml,g}$. a diferença de temperatura média logarítmica no mesmo.

$$\dot{Q}_g = U_g A_g \Delta T_{ml,g} \tag{21}$$

$$\Delta T_{ml,g} = \frac{(T_{20} - T_4) - (T_{21} - T_8)}{ln\left(\frac{T_{20} - T_4}{T_{21} - T_8}\right)} \quad (22)$$

H. Parâmetros de Desempenho

O desempenho de um sistema de refrigeração por absorção depende de sua configuração, da carga aplicada, das condições ambientais, da necessidade de refrigeração exigida e da temperatura do fluido de acionamento.

Vários critérios presentes da literatura podem ser utilizados para avaliar o desempenho de um sistema de refrigeração. Entretanto, o Coeficiente de Desempenho (COP – Coeficiente de Performance) e a Taxa de Circulação (FR) são os parâmetros mais utilizados [11]. Portanto estes são os parâmetros considerados neste trabalho, os quais podem ser calculados por (23) e (24), respectivamente.

$$COP = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_g} \quad (23)$$

$$FR = \frac{m_w}{m_s} \quad (24)$$

I. Sistema de Fornecimento de Energia

Neste trabalho o acionamento do sistema de refrigeração por absorção é efetuado por meio de energia solar, a qual é captada por coletores solares planos. Da mesma forma que nos itens anteriores, para a modelagem deste sistema foram consideradas algumas hipóteses simplificadoras e condições iniciais de funcionamento (parâmetros de entrada), visando representar as condições de trabalho nas quais o equipamento operará. As condições iniciais, isso é, parâmetros supostamente conhecidos nesta modelagem são:

i. Área dos coletores solares (A_c);

ii. Perfil de radiação solar ao longo do dia (I);

iii. Volume do tanque de termoacumulação (M_{tanq});

iv. Temperatura de bulbo seco ambiente (T_{amb});

v. Parâmetros referentes ao desempenho e tipo de coletor solar ($F_r(\tau\alpha)$e $F_R U_L$) [15].

O modelo desenvolvido para este subsistema pode ser integrado ao modelo do sistema de refrigeração em carga parcial, permitindo assim avaliar o efeito da transitoriedade de radiação solar e das condições ambientais. Tal modelagem permite estimar a temperatura da água de aquecimento do sistema (temperatura de acionamento do gerador) levando em consideração a variação do índice de radiação

solar ao longo do dia, o tamanho do tanque de termoacumulação e a área do coletor solar empregado pelo sistema. Deste modo, obtém-se uma análise do funcionamento do equipamento de refrigeração por absorção ao longo de um dia de trabalho.

Para efeito de modelagem, o subsistema de fornecimento de energia ao equipamento de refrigeração é composto dos coletores solares e do tanque de armazenamento de água quente (tanque de termoacumulação), os quais são mostrados de forma esquemática na Figura 1. Tal sistema pode ser modelado segundo equacionamento apresentando por [15], cujas equações representativas são reproduzidas abaixo:

$$\dot{Q}_u = A_c \; I \; \eta_c \tag{25}$$

$$\eta_c = F_r(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_{tentra} - T_{amb}}{I} \right) \tag{26}$$

Em que Q_u é a energia útil captada pelos coletores, η_c é a eficiência do coletor, I é a radiação solar, A_c é a área do coletor solar e T_{tentra} é a temperatura de entrada da água no coletor e T_{amb} é a temperatura ambiente.

Admitindo-se que não há estratificação da água no reser-vatório térmico, e que a taxa de adição e remoção de calor é constante, pode-se então determinar a temperatura média da água no reservatório térmico (T_{tnew}) ao final de cada intervalo de tempo considerado na simulação:

$$T_{tnew} = T_{told} + \frac{\Delta t}{M_{tanq} c_p} \left[\dot{Q}u - \dot{Q}_L - (UA)_T \; (T_{told} - T_{amb}) \right] \tag{27}$$

Em que QL é a energia extraída do reservatório, T_{old} é a temperatura no início do intervalo de tempo (Δt), e $(UA)_T$ é o produto do coeficiente global de transferência de calor (do reservatório térmico para o meio ambiente) pela sua área.

A razão entre a energia extraída do reservatório (Q_L) e a energia total necessária no gerador do sistema de refrigeração (Q_g) é definida como fração solar (29). Considerando um sistema que opere exclusivamente com a energia solar, o valor da fração solar (f_{solar}) corresponde à unidade.

$$f_{solar} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_g} \tag{28}$$

A modelagem do sistema, incluindo os princípios de conservação e as equações de estado, foi implementada em rotinas de programação elaboradas em linguagem MatLab™, criando um código computacional capaz de simular o funcionamento termodinâmico de sistemas de refrigeração por absorção de vapor, do tipo água e amônia, a partir de dados de entrada previamente estabelecidos, os quais representam as condições operacionais destes equipamentos.

23.3 Análise para Sistema de Refrigeração Operando em Diferentes Condições de Carga

Pretende-se aqui analisar a viabilidade da produção de gelo por meio de sistemas de refrigeração por absorção de vapor (água-amônia), para utilização em pequenas comunidades isoladas, utilizando energia solar. Considera-se que o sistema de refrigeração utiliza exclusivamente energia solar, e se utilizam coletores solares de tubo de vácuo. Ressalta-se que esta hipótese não contraria o objetivo final do projeto D273, pois o principal foco está na análise do sistema de refrigeração por absorção de vapor e não nos coletores solares. Caso se deseje trabalhar com temperaturas mais elevadas do produto a ser resfriado, como por exemplo, em uma câmara para armazenamento de produtos oriundos da hortifruticultura, basta substituir os coletores com tubo de vácuo por coletores solares planos, o que ainda traz o benefício de redução dos custos do conjunto.

Valores de projeto para as temperaturas de operação adotadas por [16] foram adaptados para as condições deste projeto. Entretanto, valores da diferença de temperatura nos trocadores de calor e eficiência da bomba foram mantidos, já que eles refletem condições técnico-econômica de projeto otimizadas para estes componentes. Estes autores comprovaram que uma temperatura na saída do gerador 15 °C menor do que a temperatura ótima na entrada do gerador ($T_{G, OTM}$) maximiza a vazão de refrigerante, sendo esta temperatura ótima igual a 120°C. Álvares e Trepp [17] mostraram que uma temperatura de entrada no gerador de 120°C resulta num valor otimizado da fração solar anual para o sistema analisado, enquanto temperaturas menores que 110°C causam uma acentuada redução no COP. Por conseguinte, no presente caso a restrição imposta foi de que a energia deve ser fornecida ao gerador a 130°C, resultando então uma temperatura mínima de 120°C na saída do gerador. Considerou-se também que a temperatura de evaporação, para o caso da fabricação de gelo, é igual a -10°C.

No cálculo da quantidade de gelo obtida foram utilizados dados climáticos e de radiação solar do norte de Minas Gerais. Apesar dos diferentes regimes climáticos, os resultados da simulação são ainda válidos para se verificar a viabilidade destes sistemas, quando acionados por energia solar. Nesta análise, foi considerado o perfil de temperatura de bulbo seco (Figura 2) e radiação solar diária (Figura 3), típicos do mês de janeiro.

A Figura 4 mostra o perfil de temperatura de bulbo seco média (máxima e mínima) anual, utilizado como dado de projeto. Na Figura 5 podem ser observados os valores de umidade relativa média, que são utilizados para determinação da temperatura de bulbo úmido média.

Figura 2 – Perfil de temperatura de bulbo seco para o mês de janeiro.

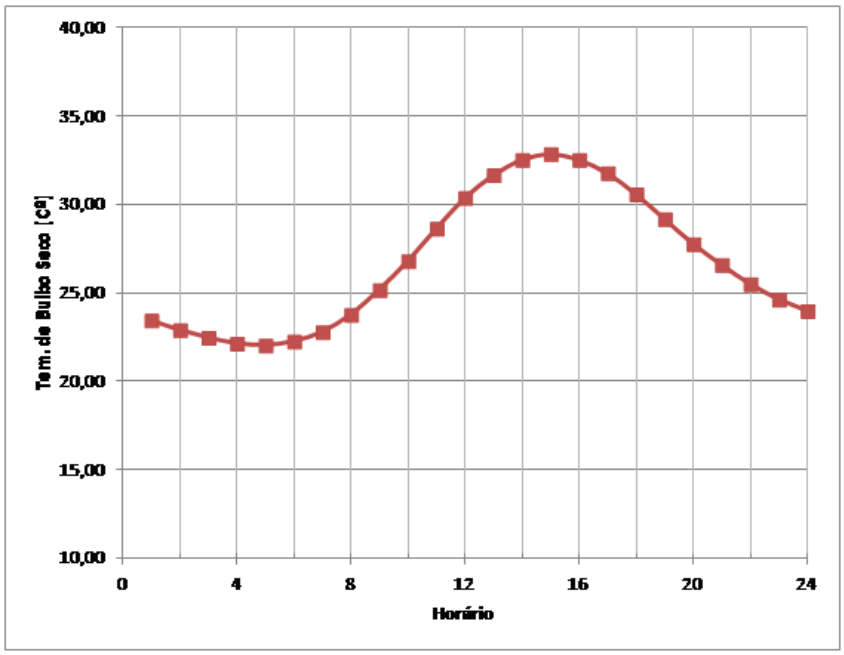


Figura 3 – Perfil de radiação solar para o mês de janeiro.

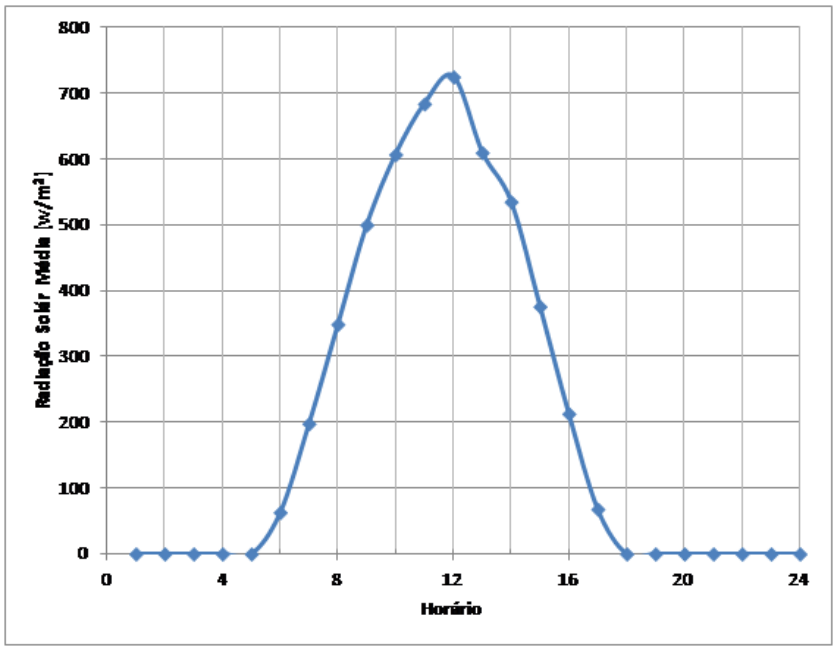


Figura 4 – Temperatura de bulbo seco média (máximas e mínimas).

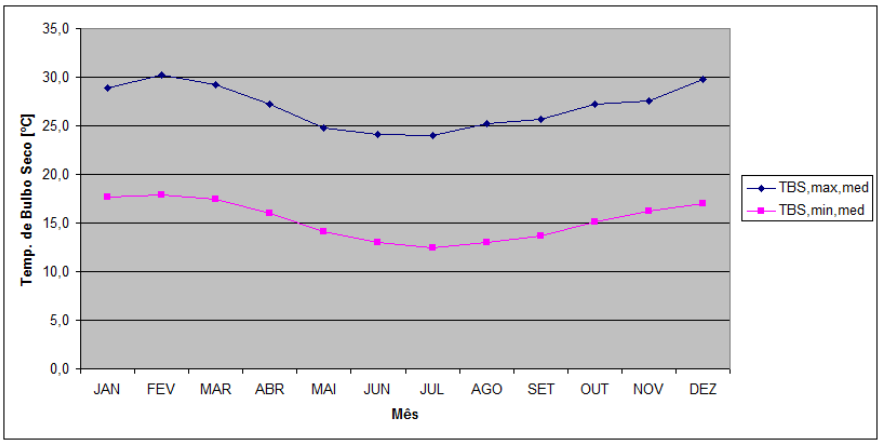
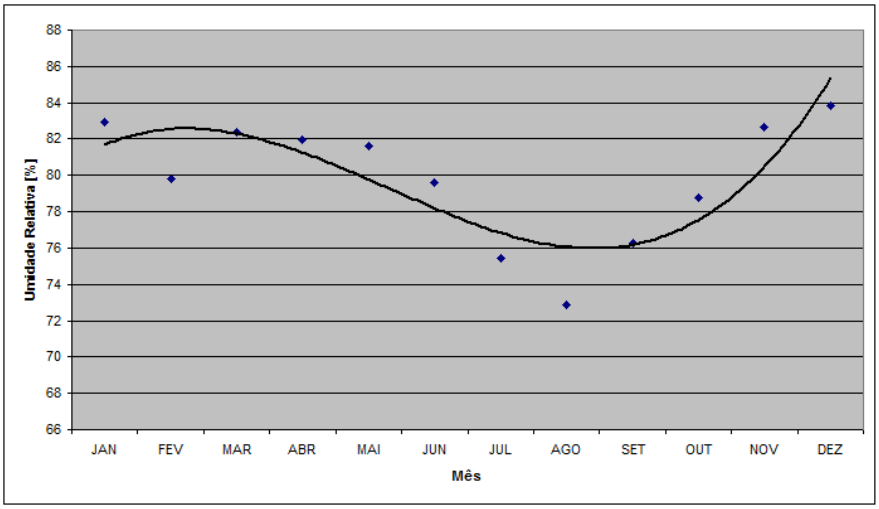


Figura 5 – Umidade relativa média.



Uma restrição imposta nesta análise foi de que somente há vazão (circulação) de água do reservatório de termoacumulação (água quente) para sistema de refrigeração por absorção quando a temperatura da água no reservatório for maior que 130°C, o que garante um bom desempenho do resfriador. Pode-se constatar que quanto maior for a vazão, mais rapidamente se extrai energia do reservatório e a temperatura da água na entrada dos coletores diminui; como resultado, a eficiência dos coletores aumenta.

Por esta razão, a vazão mássica (m_L) foi obtida considerando que a energia extraída do reservatório (Q_L) corresponde à máxima energia transferida para a água nos coletores. Esta máxima transferência de energia ocorre na condição de máxima

eficiência dos coletores e pico de radiação solar ($\eta_c = \eta_{max} = F_R(\tau\,\alpha)$ *e* $I = I_{max}$). Logo, tem-se:

$$\dot{m}_L = \frac{I_{max}\, A_c\, F_R(\tau\alpha)}{c_{p,agua}(T_{t,\,max} - T_{20})} \tag{29}$$

onde $T_{t,\,max}$ é a temperatura máxima da água no tanque, sem que haja extração de energia, e T_{20} é a temperatura da água na saída do gerador do resfriador.

Por ainda não ter sido possível realizar os testes experimentais de longa duração, a validação do modelo computacional desenvolvido foi realizada mediante comparação dos valores gerados através do mesmo com dados presentes na literatura. Como critérios de comparação foram considerados erros relativos aos parâmetros de desempenho, levando em consideração os mesmos parâmetros operacionais de funcionamento, tais como: temperaturas no gerador (T_g), no absorvedor (T_a), no condensador (T_c) e no evaporador (T_e), assim como a capacidade do sistema (Q_o), concentração de amônia na solução refrigerante e a efetividade dos trocadores de calor, quando disponíveis.

As Tabelas I a III apresentam uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo elaborado neste trabalho e aqueles fornecidos por [10], onde foram considerados os Coeficientes de Performance (COP) e a taxa de circulação (FR). A Tabela I fornece os dados de entrada utilizados, e que serviram de base para os cálculos dos parâmetros operacionais, as Tabelas II e III, fornecem os dados obtidos pelo modelo apresentado.

Observa-se que os modelos apresentam boa concordância de resultados em relação a ambos os parâmetros operacionais, apresentando um desvio relativo médio de 0,859%, com desvio padrão de 0,512 para o COP, e erro relativo médio de 1,87%, com desvio padrão de 1,19 para a taxa de circulação, para concentração de vapor de 90%. Também pode ser observado um erro relativo médio de 1,434%, com desvio padrão de 0,535 para o COP, e erro relativo médio de 2,10%, com desvio padrão de 1,09, para a taxa de circulação para a concentração de vapor de 99%, considerando a faixa apresentada de temperaturas no gerador.

Após a validação do modelo, para efeito de análise, calculou-se o volume do reservatório para uma dada área de coletores solares. Para cada volume do reservatório considerado, variou-se a área de coletores e foram obtidas a temperatura média da água no reservatório e a energia extraída, mantendo-se a restrição de que esta energia deve ser fornecida ao gerador do resfriador em temperatura não inferior à mínima especificada (130 ºC). Observou-se que para volumes menores que 500 litros, pouca energia pode ser extraída do reservatório térmico e será necessária uma grande área de coletores solares, por unidade de capacidade frigorífica.

Tabela I – Parâmetros de operação (dados de entrada).

Parâmetros operacionais		
Dados	**Este Trabalho**	**Sun (1997)**
Capacidade (kW)	10	Não fornecido
Temperatura no Gerador (ºC)	Parâmetro variável	Parâmetro variável
Temperatura no Condensador (ºC)	28	28
Temperatura no absorvedor (ºC)	28	28
Temperatura no evaporador (ºC)	-5	-5
Efetividade do subresfriador (%)	80	80
Efetividade do Pra-aquecedor (%)	80	80
Conc. De vapor da solução refrigerante (%)	90	90
Conc. De vapor da solução refrigerante (%)	99	99

Tabela II – Parâmetros operacionais para concentração de vapor de 90%.

Parâmetros Operacionais considerando concentração de vapor de 90%						
Temp. do gerador (ºC)	**COP** *Este trabalho*	**COP** *Sun (1997)*	**Erro relativo (%)**	**FR** *Este trabalho*	**FR** *Sun (1997)*	**Erro relativo (%)**
75	0,718	0,730	1,64	8,40	8,08	3,96
80	0,741	0,752	1,46	5,97	5,90	1,19
85	0,751	0,759	1,05	4,78	4,74	0,84
90	0,754	0,759	0,66	4,07	5,12	1,21
95	0,754	0,757	0,40	3,59	3,66	1,91
100	0,753	0,752	0,13	3,25	3,35	2,98
105	0,752	0,749	0,40	2,99	3,04	1,64
110	0,749	0,745	0,54	2,79	2,89	3,46
115	0,747	0,740	0,95	2,63	2,66	1,13
120	0,745	0,735	1,36	2,50	2,51	0,40
Média erro	0,859%			1,87%		
Desvio Padrão	0,512			1,19		

Tabela III – Parâmetros operacionais para concentração de vapor de 99%.

Parâmetros Operacionais considerando concentração de vapor de 99%						
Temp. do gerador (ºC)	**COP** *Este trabalho*	**COP** *Sun (1997)*	**Erro relativo (%)**	**FR** *Este trabalho*	**FR** *Sun (1997)*	**Erro relativo (%)**
75	0,687	0,677	1,48	10,07	10,32	2,42
80	0,721	0,707	1,98	6,93	7,20	3,75
85	0,734	0,721	1,80	5,45	5,56	1,98
90	0,739	0,724	2,07	4,59	4,71	2,55
95	0,739	0,727	1,65	4,03	4,17	3,35
100	0,738	0,726	1,65	3,62	3,70	2,16
105	0,736	0,726	1,37	3,32	3,40	2,32
110	0,733	0,724	1,24	3,09	3,09	0,00
115	0,729	0,724	0,69	2,90	2,93	1,02
120	0,726	0,723	0,41	2,74	2,78	1,43
Média erro	1,434%			1,87%		
Desvio Padrão	0,535			1,19		

Para reservatórios com capacidade de 1000 litros ou maiores, o maior período de tempo de extração de energia foi de aproximadamente 6 horas, normalmente das 10 horas às 16 horas.

A Figura 6 mostra que a área de coletores por unidade de capacidade frigorífica (A_C/Q_O) decresce com o aumento do volume do reservatório. Este decréscimo não é significativo para reservatórios maiores que 2.000 litros, devido às menores temperaturas da água.

Na Figura 7 pode-se observar, para uma dada área de coletores, o volume do tanque a partir do qual a produção de gelo não aumenta significativamente. Com base nesta hipótese, foram levantados também os parâmetros apresentados na Tabela IV, que mostra a área de coletor (A_C) e volume do tanque (V_t), para várias capacidades de produção de gelo.

Razões entre o volume do tanque e a área dos coletores (V_t/A_C) de aproximadamente 10 litros/m² parecem ser as mais indicadas para todos os níveis de produção de gelo. Neste caso, a relação entre produção de gelo e área de coletores varia conforme a Figura 7.

A produção diária de gelo (M_{gelo}) foi calculada por (30), considerando-se que a temperatura inicial da água é de 30°C e o gelo encontra-se a uma temperatura final de -5°C, sendo n o número de horas utilizadas para a produção do gelo, Qoi a capacidade de refrigeração do sistema de absorção, em cada uma das horas de operação, h_{agua} é a entalpia da água a 30 ºC e h_{gelo} a entalpia do gelo a -5 ºC. Vale lembrar que a mesma varia em função das condições ambientais e do nível de radiação solar incidente sobre os coletores.

$$M_{gelo} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{Q}_{o,i}\ n\ 36000}{h_{agua} - h_{gelo}} \tag{30}$$

Figura 6 – Área de coletores solares por unidade de capacidade de refrigeração (A_C/Q_O).

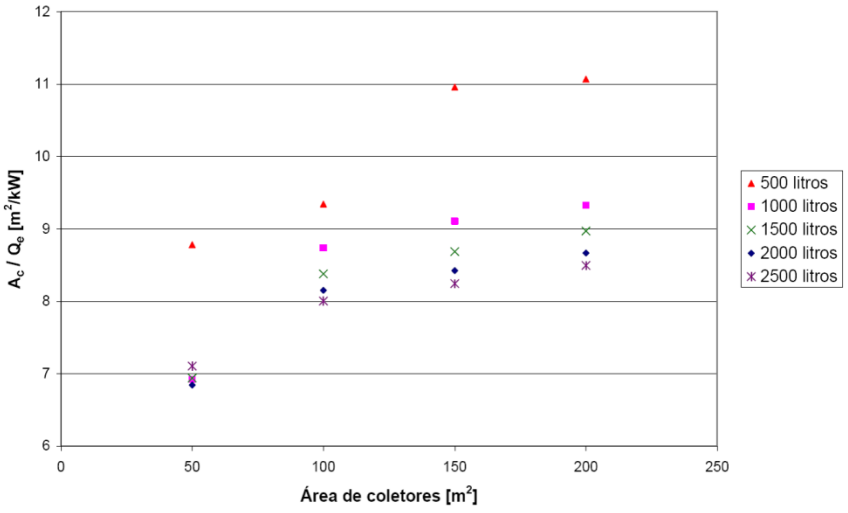


Figura 7 – Produção diária de gelo em função da área de coletores e do volume do reservatório térmico.

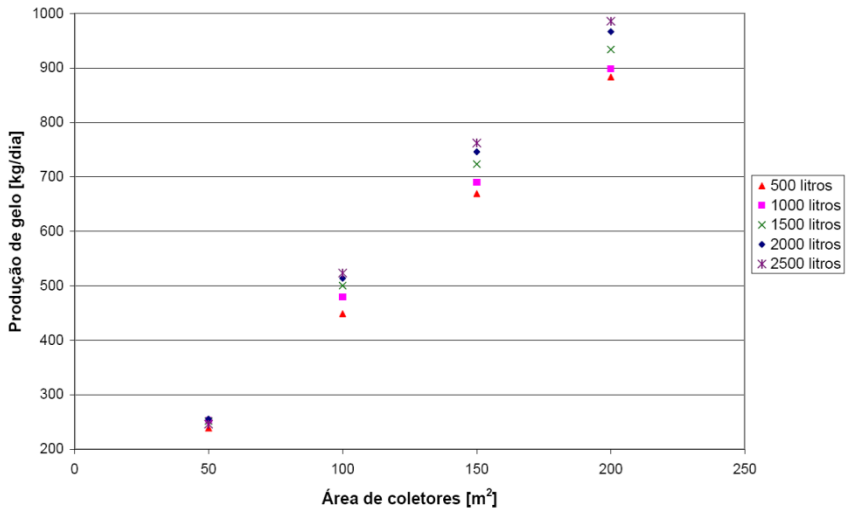


Tabela IV – Área de coletor (A_C) e volume do tanque (V_t) para vários níveis de produção de gelo.

A_C [m²]	V_t [litros]	V_t/A_c [litros/m²]	M_L [kg/s]	M_{gelo} [kg/dia]
50	500	10	0,065	233,5
100	1000	10	0,128	479,4
150	1500	10	0,193	723,5
200	2000	10	0,257	967,0

23.4 Avaliação Econômica do Sistema

Em seguida utilizou-se o método do Custo do Ciclo de Vida para se efetuar uma análise econômica preliminar do sistema de refrigeração por absorção, utilizando exclusivamente energia solar como fonte térmica. Para o cálculo da economia do ciclo de vida (LCS), foram considerados [8]:

i. Custo dos coletores solares: R$ 270,00/m²;

ii. Custo do tanque de termoacumulação: R$3,90/litro;

iii. Custo da energia elétrica: R$ 0,57/kWh;

iv. Custos anuais de manutenção: R$ 150,00/TR;

v. Custo inicial do sistema de absorção acionado por energia solar: USD 17.000,00 /TR (USD 5.100,00/kWt);

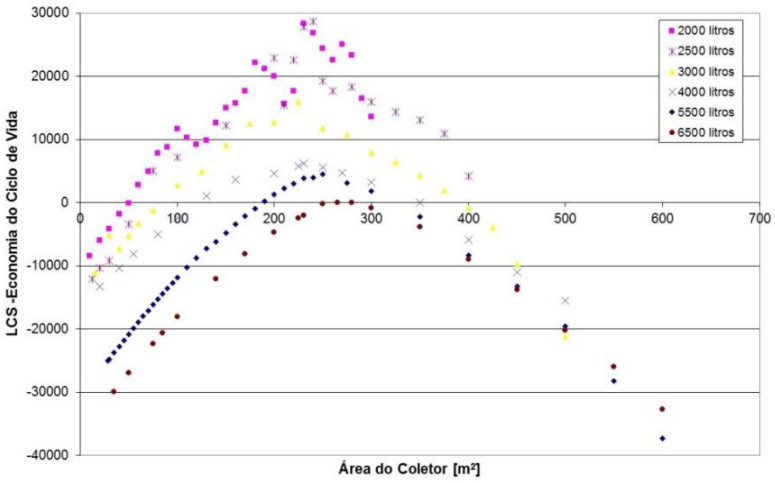
vi. Custo inicial do sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor, isto é, sistema tradicional de fabricação de gelo: USD 800,00/TR (USD 250/kWt);

vii. Vida útil dos sistemas: 20 anos;

viii. Taxa de juros: 11% ao ano.

Com base na capacidade de produção do sistema de refrigeração por absorção de vapor e considerando aos dados acima foram então calculados os máximos valores de LCS para várias capacidades do tanque de termoacumulação, como mostra a Figura 8. Pode-se verificar que, para um dado volume do reservatório, existe uma área de coletores para a qual o LCS é máximo. Observa-se que pequenos volumes do reservatório (2000 a 3000 litros) acarretam valores maiores para LCS, porém há uma maior sensibilidade deste parâmetro com relação a variações na área de coletores solares. Reservatórios térmicos maiores tornam o sistema mais "robusto" do ponto de vista econômico, mas o valor ótimo do LCS é menor. Portanto, ao se dimensionar um sistema de refrigeração solar, deverá ser escolhido um volume adequado do tanque de termoacumulação, de forma que ele também seja capaz de fornecer a energia térmica para o sistema de refrigeração operar quando a radiação solar é insuficiente para produzir o efeito de refrigeração desejado. Para Vt = 3800 litros, a curva correspondente tem LCS maior que zero e não apresenta grandes oscilações. Neste caso, o valor LCS ótimo é igual a R$ 5.461,01 e a área dos coletores e fração solar são iguais a 215 m² e 0,290, respectivamente.

Figura 8 - Valores da Economia do Ciclo de Vida (LCS) em função da área de coletores solares e dos volumes dos tanques de termoacumulação.



23.5 Montagem Final da Máquina de Refrigeração por Absorção de Vapor

Após a fabricação dos componentes descritos acima, procedeu-se à montagem da máquina de refrigeração (*chiller*) por absorção de vapor. Todos os componentes (gerador, retificados, condensador, válvula de expansão, evaporador, válvula de controle de solução, subresfriador, etc.), bem como componentes elétricos para acionamento, comando e proteção, são integrados em um equipamento, o *chiller*. A Figura 9 mostra algumas fotografias feitas durante a montagem do *skid* onde serão integrados todos os componentes do *chiller*.

Por restrições de espaço tanto do laboratório quanto da sua cobertura, não foi possível realizar os testes do equipamento, mesmos os preliminares, utilizando energia solar para fornecimento de calor ao gerador do chiller, pois trata-se de aproximadamente 70 m² de coletores solares planos. Porém ressalta-se que foram realizados testes preliminares de estanqueidade e de funcionamento no equipamento, numa instalação improvisada e montada temporariamente no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado do NEST/IEM/UNIFEI.

Ressalta-se que atualmente encontra-se em construção na UNIFEI, em área cedida pela atual reitoria "Avaliação Teórica Experimental de equipamentos de Geração de Energia Heliotérmica: Solar Dish e ORC" (CNPq- processo: 406966/2013-3), um laboratório para estudos de sistemas e equipamentos de aproveitamento de energia heliotérmica, e que no projeto deste laboratório já foi feita uma reserva de área para a instalação do protótipo do sistema de refrigeração construído no âmbito do projeto CEMIG D273, para que sejam então realizados os testes de longa duração no protótipo construído.

Figura 9 – Máquina de refrigeração (chiller) em montagem final dos componentes.

23.6 Comentários e Conclusões

Os resultados obtidos a partir do modelo desenvolvido para a simulação de sistemas de refrigeração por absorção de vapor (água-amônia), de simples efeito, acionado por energia solar. Observou-se que uma relação V_t/A_c igual a 10 litros/m² parece ser a mais indicada para diminuir para projeto destes sistemas, melhorando sua capacidade e eficiência. Pôde-se constatar também que o decréscimo da razão A_C/Q_O não é significativo para reservatórios maiores que 2.000 litros, devido às menores temperaturas da água, o que limita o tamanho dos tanques de termoacumulação.

O custo do sistema de refrigeração por absorção de vapor é quase 20 quase vezes o do sistema de refrigeração por compressão mecânica, porém deve-se considerar que o último consome eletricidade, enquanto no sistema de absorção o consumo de eletricidade é praticamente nulo ou inexistente.

Além de permitir a utilização de fontes renováveis de energia para a produção de frio, os sistemas de refrigeração por absorção podem colaborar na redução das emissões de CO2 e na eliminação e CFC´s e de HCFC´s, reduzindo o impacto ambiental associado a tais agentes.

O domínio das técnicas de projeto dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor, pode fomentar a utilização desta tecnologia no país. Ressalta-se que o domínio destas técnicas também contribuirá para o desenvolvimento de sistemas similares, como os sistemas de trigeração, que são dotados de sistemas de absorção, porém utilizam como fonte de energia o calor residual de processos ou de sistemas de geração de eletricidade, contribuindo para a economia de energia primária e para a redução da emissão de poluentes.

Capítulo 24

Capítulo 24: Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: abordagem econômica e ambiental[24]

***Resumo*- Este trabalho é resultado do P&D 194 desenvolvido pela CEMIG em conjunto com a UNIFEI, concluído em 2010. Aqui são apresentados os resultados obtidos em uma etapa do projeto. Nela, analisaram-se, do ponto de vista técnico e econômico, diferentes opções de geração de energia a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Para isto, foi desenvolvido um *software* com objetivo de auxiliar a tomada de decisão para empreendimentos focados na recuperação energética dos RSU. Com informações básicas, como a composição e quantidade do lixo gerada, o *software* é capaz de estimar o potencial energético de diferentes empreendimentos, realizando balanços de acordo com as informações fornecidas pelo usuário. Neste trabalho, com o auxílio do *software*, foi realizada uma avaliação técnico-econômica de uma cidade de 1 milhão de habitantes com uma produção anual de 365.000 toneladas de resíduos, onde duas alternativas foram analisadas. A primeira, um aterro sanitário onde se utiliza o gás de aterro para geração de eletricidade através de módulos geradores; a segunda, uma planta de incineração, também com geração de eletricidade. Os resultados mostraram que os projetos de geração de energia com gás de aterro dependem fortemente da existência de um mercado de emissões para que sejam atingidos retornos econômicos satisfatórios. Já os projetos de incineração, em razão de seu alto custo de instalação, mostraram-se dependentes das tarifas de tratamento e dos custos de instalação. Segundo o estudo, este valor deve ser o dobro do valor pago atualmente pelos municípios que despejam o RSU em aterros particulares em Minas Gerais, para que se possa atingir uma viabilidade aceitável. Na etapa seguinte, foram realizados estudos de casos que simularam plantas com recuperação do biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade, onde os resultados são aqui apresentados resumidamente. Foram escolhidos três aterros de diferentes cidades de Minas Gerais, são elas: Betim, Sabará e Uberlândia. O aterro de Betim mostrou viabilidade positiva apenas com a inclusão de um projeto nos moldes do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), entretanto esta viabilidade pode ser revertida facilmente em cenários mais pessimistas. Igualmente, o aterro de Uberlândia mostrou boa viabilidade apenas com o projeto MDL. Porém, desta vez, o resultados foram mais robustos, em razão da junção dos potenciais do aterro novo e do antigo que estão localizados lado a lado. O aterro de Sabará mostrou uma alta atratividade econômica, principalmente com a inclusão de um projeto MDL. Os resultados mostram que o**

[24] LEME, M. M. V.; VENTURINI, O. J.; LOPES, B. M.; LORA, E. E. S.; SILVA, C. H. F. da; ROCHA, M. H.. Publicado em VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2011, Fortaleza.

projeto é viável com ou sem a obtenção de créditos de carbono, e que são necessários preços de comercialização de energia e carbono impraticáveis, e altas taxas de juros para que o projeto se torne inviável. Ao final do trabalho é apresentado resumidamente os resultados da avaliação ambiental dos sistemas propostos, realizada através de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV). O objetivo da etapa foi o de comparar diferentes alternativas de disposição e tratamento dos RSU com e sem recuperação de energia no contexto brasileiro. O estudo foi conduzido no aterro municipal de Betim (MG). Foram propostos três cenários. O aterro sanitário sem a utilização do biogás (Cenário base); o uso do biogás gerado pelo aterro em Motores de Combustão Interna (MCI) para geração de eletricidade; e um sistema de incineração com geração de eletricidade. O comportamento ambiental destes cenários foi comparado utilizando a metodologia de ACV, com base na série de normas ISO 14040, recentemente contemplada como uma das ferramentas da Política Nacional dos Resíduos Sólidos. A unidade funcional selecionada foi 1 t de RSU. Os resultados indicam que os aterros sanitários são a pior opção para o gerenciamento do lixo em 5 das 6 categorias de impacto selecionadas, são elas: aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio e depleção de recursos abióticos. Significantes ganhos ambientais podem ser obtidos com a recuperação energética dos resíduos. A incineração mostrou-se a melhor opção entre as estudadas, porém, é dependente de um moderno sistema de controle de efluentes atmosféricos capaz de cumprir com os padrões de emissão estabelecidos pela legislação.

24.1 Introdução

Os resultados aqui apresentados são resultado do P&D-194, de título: Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia a partir dos RSU e poda de árvores.

Na primeira parte deste trabalho analisaram-se algumas tecnologias de conversão energética dos resíduos de um ponto de vista ambiental, através de uma ACV, onde os principais resultados são apresentados ao final deste artigo.

Na segunda parte, a análise teve como foco a viabilidade econômica, com ênfase no desenvolvimento de um *software* para auxiliar este tipo de diagnóstico. Através do *software*, compararam-se as opções de incineração e biogás de aterro para a geração de eletricidade, cujos resultados são mostrados aqui detalhadamente.

Adicionalmente, se avaliou a possibilidade de se gerar eletricidade nos aterros de Betim (MG), Sabará (MG) e Uberlândia (MG). Este estudo foi efetuado na última parte do P&D 194 e os resultados são resumidamente apresentados neste trabalho.

Os resíduos gerados nas cidades levam a uma série de problemas ambientais e sociais. No Brasil, a inexistência de uma política adequada para o setor, fez com que os lixões se tornassem a solução preferencial das prefeituras. Entretanto, nos últimos anos, os municípios brasileiros tentam implantar aterros sanitários em seus

territórios, considerados pelo poder público como uma alternativa ambientalmente adequada e acessível.

Porém, em países onde a esfera ambiental se encontra em maiores patamares de importância, esta alternativa é considerada apenas como última opção. Estes países têm procurado soluções sustentáveis para o tratamento do lixo urbano, buscando soluções que satisfaçam às esferas social, ambiental e econômica. Por exemplo, a diretiva do conselho europeu 2008/98/EC [1], estabeleceu uma hierarquia nos métodos de gerenciamento dos resíduos, a qual prevê a seguinte ordem de prioridade: prevenção (uso de processos produtivos que gerem menos resíduos), preparação para reuso, reciclagem, recuperação (incluindo a recuperação de energia), e finalmente, como último recurso, a disposição final em aterros. A diretiva recomenda que os estados membros da UE tomem medidas para promover as opções com melhor desempenho ambiental, recomendando o uso da ACV como ferramenta de avaliação.

Existem vários métodos para se produzir energia através dos RSU. Mundialmente, a tecnologia mais comum é a incineração direta dos resíduos com subsequente uso do calor gerado em um ciclo Rankine a vapor. Quando a opção é o uso de aterros sanitários, o biogás rico em metano, produzido pela decomposição anaeróbica da fração orgânica do RSU, é comumente usado em Motores a Combustão Interna – MCI ou, mais raramente, em turbinas a gás – TG para gerar eletricidade [2].

24.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Metodologia

Para avaliar estas alternativas, foi desenvolvido no âmbito do projeto um *software* capaz de realizar diagnósticos técnico-econômicos dessas. O objetivo do programa é auxiliar a tomada de decisão para a construção de empreendimentos focados na recuperação energética dos RSU, baseando-se em indicadores econômicos habitualmente utilizados em análises de investimento como o Fluxo de Caixa, o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno.

Com informações sobre o resíduo gerado na cidade, o *software* é apto a estimar o potencial energético do RSU, realizando balanços de acordo com as informações fornecidas pelo usuário. Como qualquer análise econômica, os resultados são influenciados por inúmeras variáveis. Portanto, o programa foi desenvolvido para dar liberdade ao usuário para estabelecer todos os parâmetros envolvidos no diagnóstico.

Foram desenvolvidas duas metodologias para empreendimentos distintos. A primeira, criada para estimar a viabilidade econômica de projetos de geração de energia com biogás de aterros sanitários. Nela, parte-se da premissa que o aterro já está construído e o empreendedor pretende aproveitar o potencial para produzir e vender energia elétrica e gerar créditos de redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GHG). O usuário tem liberdade para escolher qual grupo gerador pretende aplicar no aterro, sejam Turbinas a Gás, Motores a Combustão Interna, Motores

Stirling ou qualquer outro tipo de tecnologia que utilize o biogás para gerar eletricidade.

A segunda metodologia tem por objetivo estimar a viabilidade econômica de projetos de incineração de lixo com recuperação de energia. Diferentemente da anterior, nela são considerados os custos de implantação do zero, portanto, são considerados os custos da compra de terra, terraplanagem, e outros, bem como as receitas provenientes do tratamento do lixo. Esta distinção foi necessária para adaptar os empreendimentos à realidade brasileira, pois, em sua totalidade, os projetos de aterros com geração de energia são desenvolvidos em aterros pré-existentes.

Para o cálculo da produção de metano no aterro o programa utiliza a metodologia do IPCC [3] e para calcular a geração de créditos de carbono baseia-se nas metodologias aprovadas pela UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) ACM0001 [5] e ACM0002 [6]. O poder calorífico do lixo é determinado com as informações de Kathiravale [4], e do IPCC [3].

Após realizar o balanço de energia das alternativas, o *software* calcula o fluxo de caixa do empreendimento, com base nos custos informados pelo usuário, nos preços de venda da energia e créditos de carbono e nas taxas consideradas.

Os custos de capital e operação e manutenção dos projetos de biogás foram obtidos de [7] e [8]. Em razão da inexistência deste tipo de empreendimento, não foram encontrados estudos contundentes sobre os custos de plantas de incineração para energia no Brasil. Neste caso, utilizaram-se os custos médios de instalação e operação de outros países.

Segundo Citizens [9], incineradores economicamente viáveis no Canadá devem queimar no mínimo 1.000 toneladas diárias e o custo aproximado de uma instalação deste porte é de cerca de US$100 milhões. De acordo com McLanaghan [10] as plantas de incineração na Europa com capacidades de queimar 400 mil toneladas por ano tem um custo de capital variando de US$109 a US$150 milhões e custos operacionais da ordem de US$53 a US$83 por tonelada incinerada. Estes custos incluem a recuperação de energia, algo inerente a qualquer planta de incineração de RSU, pois a venda de eletricidade e calor é essencial para abater seus altos custos da instalação.

Segundo Reimann [11], a eficiência elétrica média das plantas de incineração é de 18%, e de 63% para produção de calor. Estas plantas são menos eficientes que plantas convencionais de energia. Isto acontece, principalmente, devido à redução dos limites de pressão e temperatura do vapor, estabelecidos para se evitar problemas de corrosão.

A eficiência de um ciclo Rankine é função dos parâmetros de temperatura e pressão do vapor. Nas turbinas, a eficiência de conversão da energia do vapor em trabalho aumenta com a ampliação destes parâmetros. Entretanto, com temperaturas mais altas, as superfícies de troca de calor na caldeira ficam sujeitas à corrosão de

alta temperatura, causada pelas concentrações de compostos de cloro. A concentração destes compostos depende unicamente da composição dos RSU, o que varia de região para região [12]. Existe um grande número de metodologias aprovadas na UNFCCC que podem ser aplicadas para a determinação da quantidade de créditos de carbono de projetos de incineração. Cabe ao empreendedor definir a melhor maneira de utilizá-las. Diferente do gás de aterro, não há um método consolidado de cálculo para as condições brasileiras.

Uma planta de incineração não apenas substitui outras formas não renováveis de geração de energia, mas também evita a formação de metano em aterros sanitários, os quais são a linha de base dos RSU no Brasil. Em outras palavras, se o lixo não for incinerado terá como destino mais provável um aterro. Neste trabalho a linha de base foi definida da seguinte maneira:

1 – Emissões de GHG geradas pelo consumo de combustíveis fósseis usados na geração de energia no SIN. Este valor é definido diariamente pela ONS. Nesta análise utilizou-se o valor médio de 0,25 tCO2 eq/MWh.

2 – Emissões de metano geradas pela disposição dos resíduos em um aterro sanitário, determinadas neste caso pela metodologia do IPCC (2006).

A linha de base define as emissões que ocorreriam na ausência do projeto. Porém, para estimar as reduções de emissão, é preciso determinar as emissões que ocorreriam caso o projeto seja executado.

Plantas de incineração emitem basicamente GHG na forma de CO_2 fóssil, em razão da queima de resíduos de origem fóssil (i.e. plásticos, certos tecidos, solventes líquidos, óleos e borrachas), e N_2O formado na combustão do resíduo. Geralmente as emissões de CO_2 são significantemente maiores que as de N_2O. Entretanto, o ultimo possui um potencial de aquecimento global (GWP) 296 vezes maior que o CO_2 [13]. Com a informação da composição gravimétrica do lixo o programa estima automaticamente a porcentagem de carbono fóssil no lixo e consequentemente as emissões de CO_2 fóssil através das informações do IPCC [3].

B. Estudo de Caso

Foram analisadas duas alternativas de geração de energia com os RSU em uma cidade hipotética. A primeira opção consiste no uso de um aterro sanitário pré-existente com subsequente uso do biogás gerado em motores a combustão interna. A segunda opção se refere à queima do resíduo urbano em um incinerador de queima em massa com geração de eletricidade.

A cidade produz 1000 toneladas diárias de RSU, o que equivale a uma população de 1 a 1,5 milhões de habitantes, com a composição gravimétrica apresentada na tabela I abaixo, semelhante a capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Tabela I – Composição gravimétrica do RSU.

Componente	$\%_{m/m}$
Restos de alimentos	61
Plásticos	10
Papel	11
Vidro	2
Metais	3
Inertes	13

Na opção 1, o lixo é depositado em um aterro sanitário com vida útil estimada de 20 anos, com início de operação em 2008 e fim previsto em 2028. O aterro pertence ao município, e a empresa responsável pelo empreendimento ganhou o direito de explorar o biogás gerado no local. Na opção 2, incineração, consideramos que uma empresa privada é responsável pelo empreendimento e, portanto, recebe receitas do município para tratar o lixo. A incineração não inibe a existência de um aterro sanitário, pois a escória e as cinzas volantes devem ser enviadas a um aterro de inertes adequado, neste caso, consideramos que estes resíduos são enviados a um aterro de inertes privado.

Os seguintes valores de preços e taxas foram considerados no estudo:

Tabela II – Valores de referência de preços e taxas.

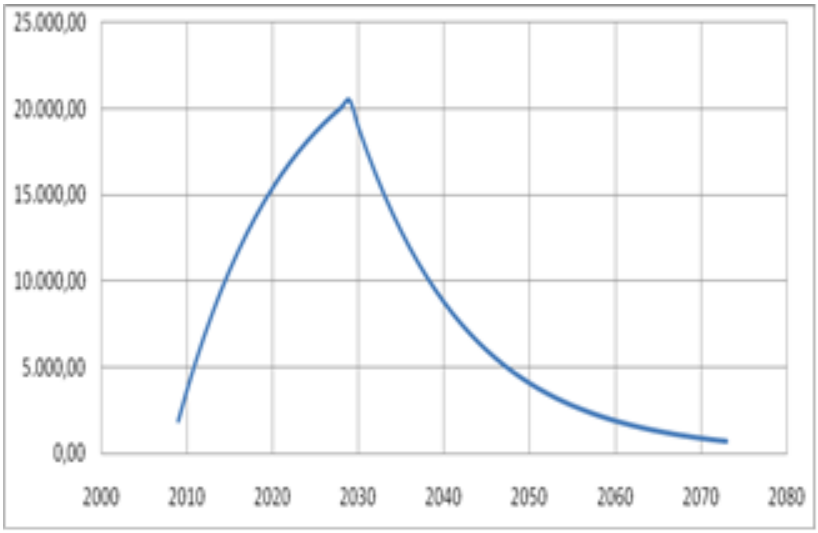
Parâmetro			Referência
Venda de Eletricidade	65	US$/MWh	[13]
Créditos de Carbono	10	US$/ton CO_2	[14]
Taxa de Desconto Anual	10,25	%a.a	[15]

C. Resultados – Biogás de aterro

Após informar os dados necessários ao *software*, é gerada a curva de produção de metano no aterro, mostrada na Figura 1. A seguir, determinam-se quais módulos de geração serão utilizados e seu cronograma de instalação e desinstalação.

Neste caso, consideramos o uso do módulo gerador, o qual utiliza o Motor a Combustão Interna (MCI) Caterpillar G3520C (1966 ekW / 2458 kVA) com vida útil estimada de 8 anos e eficiência de 38%. Os MCI são a alternativa mais comum no aproveitamento de gases de aterro para geração de energia devido a seu baixo custo de investimento e facilidade de operação e manutenção. A principal desvantagem destes sistemas é representada pelas altas quantidades de NOX e CO gerados que, de fato, comparando-se com outras tecnologias, são altas [16].

Figura 1 – Curva de geração de metano no aterro [Mg de CH4/ano].



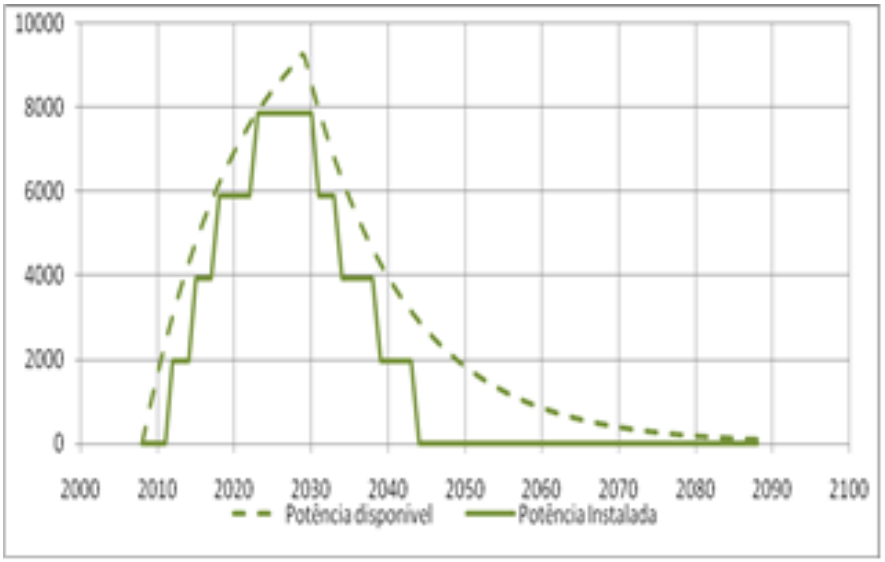
A configuração utilizada encontra-se na Tabela III abaixo, e logo após, a curva de potência, disponível e instalada, na Figura 2. Segundo a USEPA [7] a instalação de uma planta de biogás tem um custo estimado de US$ 1.400.000 por MW, o que inclui engenharia, conexão com a rede, outros custos de serviços profissionais, bem como os custos de compra, entrega e instalação do equipamento.

Esta configuração é uma das possíveis formas de se aproveitar o biogás produzido. Ela só é viável, pois consideramos que o aterro foi concebido para a geração de energia e a operação da planta está integrada com o manejo dos RSU. Normalmente, em aterros antigos, a geração de energia ocorre apenas após o fechamento do aterro, caso do Aterro Bandeirantes e do Aterro São João, em São Paulo.

Tabela III – Características dos módulos de geração instalados no aterro.

	Potencia [kWe]	**Início da Operação**	**Fim da Operação**
Módulo 1	1966	2012	2019
Módulo 2	1966	2015	2022
Módulo 3	1966	2018	2025
Módulo 4	1966	2020	2027
Módulo 5	1966	2023	2030
Módulo 6	1966	2023	2030
Módulo 7	1966	2026	2033
Módulo 8	1966	2028	2035
Módulo 9	1966	2031	2038
Módulo 10	1966	2036	2043

Figura 2 – Curvas de potência disponível e instalada no aterro [kW/ano].



Os resultados do *software* mostram que no período de funcionamento do empreendimento (2012 a 2043) produziu-se 1,2 GWh de eletricidade a um custo específico de 28 $/MWh e evitou-se a geração de 1.6 milhões de t de CO_2 eq. A existência de um mercado de emissões de gases do efeito estufa até o fim do projeto (2043) é algo em discussão, portanto, foram analisados dois cenários distintos, um incluindo o projeto de MDL e outro não. As tabelas IV e V a seguir apresentam os resultados obtidos na análise em distintos cenários de juros básicos.

Tabela IV – Resultados da Análise no aterro, excluindo-se o projeto MDL.

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL	4.558.863	-4.474	-1.640.531
TIR		10%	
Custos de Capital	17.686.417	12.225.965	9.480.482
Custos com O&M	17.625.994	9.932.576	6.606.676
Venda de Eletricidade	39.871.274	22.154.067	14.446.627
Créditos de Carbono	0	0	0

Nota-se, nos resultados, que a existência de um mercado de emissões nos parâmetros atuais aumenta significantemente o valor da TIR e é fundamental em um cenário de juros altos para que se atinja um VPL positivo. Isto ocorre, pois o custo de se implementar um projeto MDL é pequeno em relação as receitas obtidas pelos créditos de carbono. Afinal, todas as estruturas para a destruição do metano estarão de qualquer forma construídas (Sistema de captação, Flares e Motores).

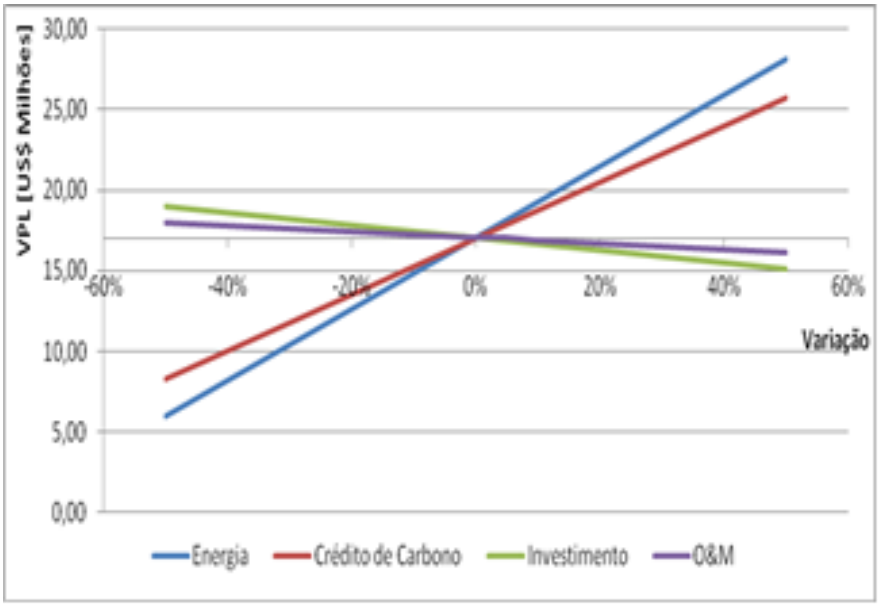
Tabela V – Resultados da Análise no aterro, com o projeto MDL.

Taxa de Juros ($\%_{a.a}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL	34.946.912	17.044.223	9.679.783
TIR		47%	
Custos de Capital	17.781.655	12.316.668	9.567.439
Custos com O&M	18.100.074	10.212.368	6.804.391
Venda de Eletricidade	39.871.274	22.154.067	14.446.627
Créditos de Carbono	30.957.367	17.419.192	11.604.987

D. Análise de Sensibilidade – Biogás de aterro

A análise de sensibilidade tem como objetivo principal determinar a confiança sobre o modelo, estudando as incertezas associadas a seus resultados. Muitos dos parâmetros envolvidos nos cálculos representam valores que são frequentemente de pouca certeza. Portanto, se torna importante determinar como as variações nestes parâmetros podem influir nos resultados. A análise foi realizada sobre os principais parâmetros econômicos do modelo, a uma taxa de juros de 10,25% ao ano. São eles: o preço de venda da eletricidade, o preço dos créditos de carbono, o custo total de investimento, e os custos anuais de operação e manutenção. Iremos considerar uma variação nos parâmetros de ±50%. Os resultados são mostrados na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Resultados da Análise de Sensibilidade para biogás de aterro.



Na figura, o eixo das abscissas mostra a variação em pontos percentuais dos parâmetros estudados em relação aos valores base, já o eixo das ordenadas mostra o VPL do investimento. Observa-se que todas as curvas interceptam-se no mesmo ponto, o qual é o valor determinístico, ao serem substituídas todas as variáveis por seus valores base.

É importante notar como a curva se comporta com a variação no eixo horizontal. As curvas que apresentam maiores declividades, seja positiva ou negativa, merecem especial atenção porque uma pequena variação no valor esperado tem maiores reflexos no resultado final. Nota-se que as curvas com maior declividade são as de eletricidade e créditos de carbono. Portanto, estes são os parâmetros de maior risco no projeto, pois suas variações têm maior peso sobre a rentabilidade do investimento.

E. Resultados – Incineração

Considerou-se a instalação de uma planta de incineração de queima em massa (*Mass Burn System*) com uma vida útil de 20 anos e uma eficiência elétrica de 18%. O programa, com base na composição do RSU, estima sua composição elementar e depois seu Poder Calorífico Inferior (PCI) onde se obteve o valor de 4037 kJ/kg. Deste modo, com o tratamento de 365.000 toneladas de RSU temos uma potência disponível de 8.411 kW ao longo dos 20 anos.

O objetivo primordial de uma planta de incineração é tratar o lixo. Deste modo, não é aceitável que o lixo se acumule em razão de problemas operacionais. Portanto, deve-se assegurar que a planta consiga tratar todo o volume de lixo produzido pela cidade. Para isso, iremos considerar o uso de 5 módulos de 2 MW com capacidade de queimar 91.250 toneladas por ano cada, o suficiente para suprir a demanda de 365 000 toneladas, sendo que um dos módulos pode permanecer parado para manutenção e situações de emergência. Os 4 módulos produzem uma capacidade instalada de 8.000 kW.

Além das receitas com créditos de carbono e eletricidade, uma planta de incineração obtém receitas do próprio tratamento de lixo. Na etapa de coleta de dados deste trabalho, em visitas técnicas a aterros da região metropolitana de Belo Horizonte, informou-se que empresas gestoras dos aterros cobram das prefeituras um valor médio de R$ 45,00 por tonelada de lixo enviada aos locais. A seguir, nas tabelas VI e VII, apresentam-se os resultados da avaliação econômica para o caso da incineração com recuperação de energia. Do mesmo modo que no caso dos aterros foram analisados dois cenários distintos, um com o projeto MDL e outro sem.

Tabela VI – Resultados da análise na incineração, sem o projeto MDL.

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL	-14.854.551	-50.743.952	-67.541.711
TIR		4%	
Custos de Capital	148.571.429	141.496.599	135.652.174
Custos com O&M	55.718.218	9.932.576	6.606.676
Venda de Eletricidade	58.402.915	22.154.067	14.446.627
Créditos de Carbono	0	0	0
Tarifa de tratamento	131.032.181	86.861.064	64.513.363

Tabela VII – Resultados da análise na incineração, com o projeto MDL.

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL	5.201.497	-50.743.952	-67.541.711
TIR		5%	
Custos de Capital	148.666.667	141.587.302	135.739.130
Custos com O&M	56.102.853	35.078.608	25.346.802
Venda de Eletricidade	58.402.915	38.715.217	28.754.528
Créditos de Carbono	20.535.921	13.613.236	10.110.809
Tarifa de tratamento	131.032.181	86.861.064	64.513.363

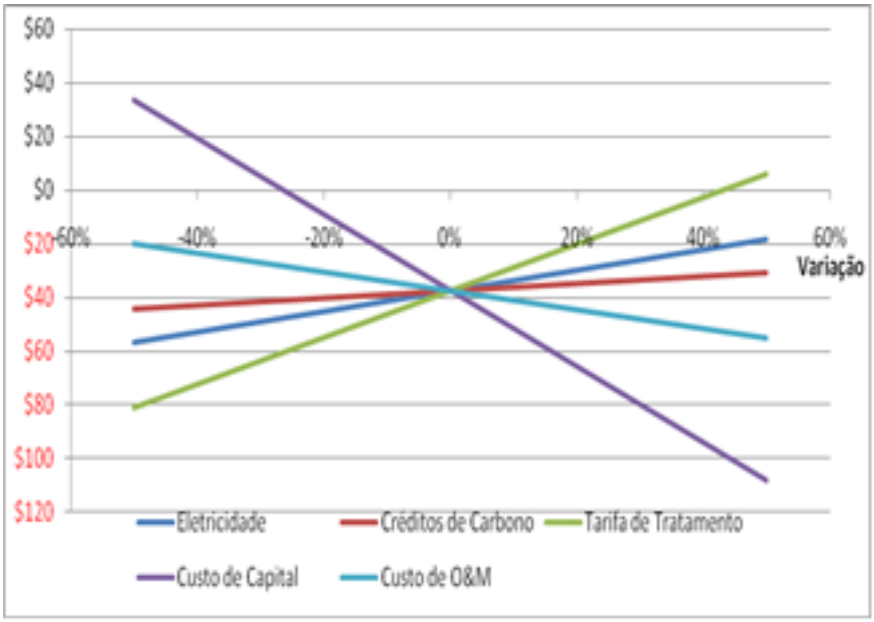
Observa-se que o único cenário com VPL positivo é o com créditos de carbono e a taxa de juros de 5% ao ano. Mesmo a obtenção de reduções de emissões de GHG não se mostrou promissora, pois aumentou a TIR do investimento em apenas 1%. A obtenção de créditos de carbono de projetos deste tipo é comum na Índia e na China. Esses países possuem um taxa de emissão no sistema elétrico da ordem de 1 tCO_2/MWh, cerca de quatro vezes maior que a brasileira em razão de sua dependência do carvão mineral para geração de eletricidade [17].

Assim como ocorre em outros países, a incineração se torna atraente com o pagamento de altas taxas de tratamento. Em nosso caso, é preciso dobrar esta taxa para que se atinjam TIRs maiores que 15%.

F. Análise de Sensibilidade - Incineração

Do mesmo modo, realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo desenvolvido para incineração, os resultados encontram-se na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Resultados Análise de Sensibilidade para Incineração.



Observa-se que as curvas com maior inclinação em relação ao eixo das abscissas são as de custo de capital e tarifa de tratamento, além disso, estas foram as únicas capazes de gerar um resultado positivo no VPL na faixa de variação estudada (±50%). O empreendimento passa a ser viável (VPL positivo) com custos de capital 25% abaixo do estipulado, ou então com uma tarifa de tratamento 45% maior que a usada. Atingir este valor pode ser difícil no Brasil, já que os municípios não estão habituados a pagar por este serviço. Porém, acredita-se que os custos de uma planta de incineração podem ser abatidos até os 25% necessários ou até mais, caso parte dos equipamentos da planta sejam produzidos em território nacional, o que abateria os custos de importação.

G. Conclusões

O modelo desenvolvido permitiu estabelecer os principais parâmetros envolvidos na análise de viabilidade econômica dos projetos. No caso dos aterros sanitários, os principais fatores são o preço de venda da eletricidade e dos créditos de carbono, já na incineração são os custos de capital e a tarifa de tratamento dos RSU.

Os projetos de geração de energia com gás de aterro mostraram-se dependentes da existência de um mercado de emissões, sem ele, a viabilidade do investimento fica subordinada a bons preços de venda de eletricidade, os quais possuem alta volatilidade. Já na incineração, os créditos não se mostraram tão importantes, em razão da baixa emissão de GHGs do sistema interligado nacional.

Os custos de instalação de uma planta de incineração são conhecidamente altos, principalmente em razão dos equipamentos necessários para o tratamento dos

efluentes gasosos, essenciais para cumprir os limites de emissão estabelecidos pelas legislações. Para resultados mais concisos, é necessário conhecer com maior precisão os custos de capital e de O&M destas plantas no contexto brasileiro. Porém, fica claro que estes empreendimentos são dependentes das tarifas de tratamento, do mesmo modo que os países europeus. Segundo o estudo, este valor deve ser o dobro do valor pago pelos municípios que despejam o RSU em aterros particulares, cerca de R$ 45,00, os quais já são altos, considerando-se que a maioria dos municípios despeja seu lixo em lixões a custos muito baixos.

24.3 Estudo de Caso em Aterros de MG.

Nesta etapa do projeto foram realizados estudos de casos que simularam plantas com recuperação do biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade. Foram escolhidos três aterros de diferentes cidades de Minas Gerais, são elas: Betim, Sabará e Uberlândia. Aqui são apresentados resumidamente os resultados da análise.

O estudo foi conduzido com o auxílio do *software* desenvolvido neste trabalho. Para aumentar a confiança sobre os resultados foram estudados diferentes cenários, onde ocorre a variação dos parâmetros técnicos e econômicos envolvidos na análise. A seguir são mostradas as curvas de potência instalada e disponível nos aterros analisados.

Nas figuras, as curvas (k-) representam uma taxa de degradação do RSU aterrado 12,5% inferior à taxa de degradação recomendada pelo IPCC [3] e as curvas (k+) uma taxa 12,5% maior, isto foi realizado para aumentar a confiança do modelo, encontrando-se deste modo, taxas de variação na produção de metano. A constante de decaimento k define a taxa com que os microorganismos consomem os resíduos para produção de metano, portanto, depende da atividade bacteriana no interior da massa de resíduos, que por sua vez, é função de fatores como a disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade [18].

Figura 5 – Curvas de potência instalada e disponível no aterro de Betim.

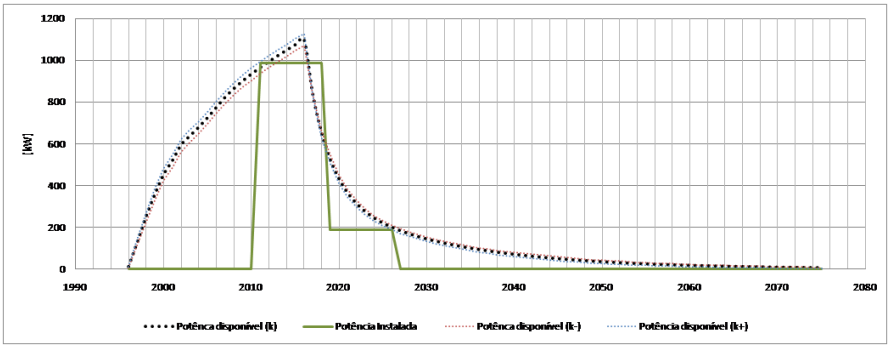


Figura 6 – Curvas de potência disponível e instalada no aterro de Sabará.

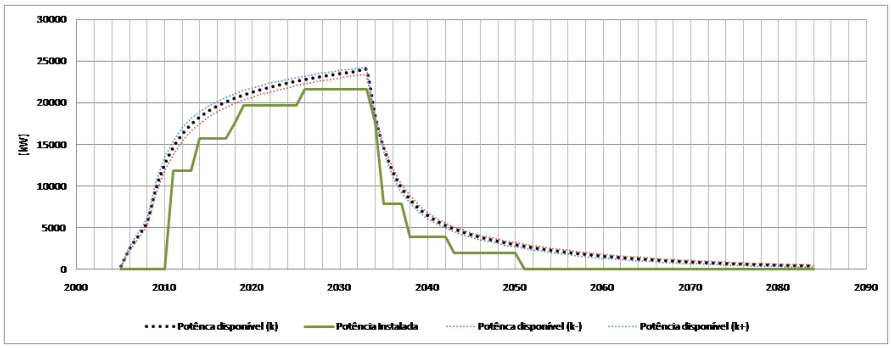
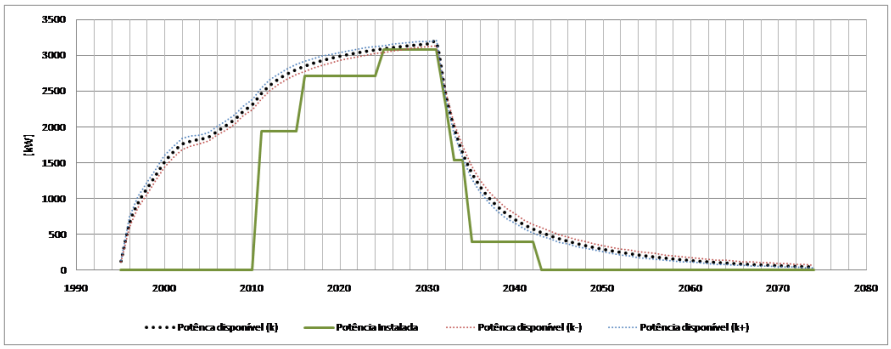


Figura 7 – Curvas de potência disponível e instalada no aterro de Uberlândia.



Nas tabelas abaixo são apresentados os resultados da avaliação econômica executada com auxílio do programa para os aterros das três cidades analisadas. Do mesmo modo que no item apresentado anteriormente, analisaram-se para cada cidade dois cenários distintos, um com a existência do projeto MDL e outro sem.

Tabela VIII – Resultados da Análise para o aterro de Betim (Sem MDL).

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL [US$]	-1.475.119	-1.312.628	-1.233.323
TIR		----	
Custos de Capital	2.155.255	2.007.629	1.898.828
Custos com O&M	3.382.245	2.525.491	2.019.454
Venda de Eletricidade	4.062.381	3.220.491	2.684.960
Créditos de Carbono	0	0	0
Custo Específico [US$/MWh]	79,8	65,4	56,5

Tabela IX – Resultados da para o aterro de Betim (com MDL).

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL [US$]	933.812	548.863	291.594
TIR		23%	
Custos de Capital	2.250.494	2.098.332	1.985.785
Custos com O&M	4.691.451	3.537.585	2.843.565
Venda de Eletricidade	4.062.381	3.220.491	2.684.960
Créditos de Carbono	3.813.375	2.964.289	2.435.984
Custo Específico [US$/MWh]	100,1	81,3	69,6

Tabela X – Resultados para o aterro de Uberlândia (Sem MDL).

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL [US$]	2.285.562	-340.481	-1.049.767
TIR		9%	
Custos de Capital	8.038.990	6.125.613	5.136.734
Custos com O&M	11.485.918	6.896.437	4.827.447
Venda de Eletricidade	20.810.469	12.681.570	8.913.413
Créditos de Carbono	0	0	0
Custo Específico [US$/MWh]	38,9	26,0	19,9

Tabela XI – Resultados para o aterro de Uberlândia (Com MDL).

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL [US$]	16.411.168	9.072.837	5.725.803
TIR		58%	
Custos de Capital	8.134.228	6.216.316	5.222.690
Custos com O&M	19.444.878	11.216.316	8.222.690
Venda de Eletricidade	20.810.469	12.681.570	8.913.413
Créditos de Carbono	23.179.805	14.293.198	10.200689
Custo Específico [US$/MWh]	55,0	35,7	26,7

Tabela XII – Resultados para o aterro de Sabará (Sem MDL).

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL [US$]	35.338.187	14.361.497	5.637.959
TIR		21%	
Custos de Capital	47.097.206	34.483.606	28.212.159
Custos com O&M	70.242.937	40.267.061	27.326.804
Venda de Eletricidade	152.678.330	89.112.164	61.176.922
Créditos de Carbono	0	0	0
Custo Específico [US$/MWh]	29,7	18,9	14,1

Tabela XIII – Resultados para o aterro de Sabará (com MDL).

Taxa de Juros ($\%_{aa}$).	**5,00%**	**10,25%**	**15,00%**
VPL [US$]	132.367.898	72.081.004	46.198.928
TIR		99%	
Custos de Capital	47.192.444	34.574.309	28.299.115
Custos com O&M	120.830.947	69.210.608	46.930.940
Venda de Eletricidade	152.678.330	89.112.164	61.176.922
Créditos de Carbono	147.712.958	86.753.757	60.252.062
Custo Específico [US$/MWh]	42,5	26,3	19,0

Os aterros de Betim e Uberlândia servem a cidades de médio porte (500 mil e 600 mil hab. respectivamente), já o aterro de Sabará recebe o lixo 6 cidades da região metropolitana de Belo Horizonte, atendendo atualmente uma população de mais de 2,7 milhões de habitantes.

Os aterros se distinguem de forma significativa, principalmente em razão do potencial de geração de eletricidade, fato que permitiu concluir que a viabilidade econômica destes projetos depende fortemente do potencial energético do local onde se pretende aplica-lo.

O aterro de Betim mostrou viabilidade positiva apenas com a inclusão de um projeto MDL, entretanto esta viabilidade pode ser revertida facilmente em cenários mais pessimistas de preços de eletricidade e créditos de carbono. O principal empecilho para melhores resultados no projeto ocorre, pois, boa parte do potencial do aterro já foi desperdiçada nos anos que se passaram sem aproveitamento do biogás.

O antigo aterro de Uberlândia foi fechado em 2010, o que incorreria em uma situação pior que a do a do aterro de Betim. Entretanto, o novo aterro foi construído

ao lado do atual, e o potencial dos dois locais somados se mostrou atrativo. Os resultados mostraram novamente que o projeto MDL é essencial em um aterro deste porte, porém desta vez, o resultados foram mais robustos e possíveis variações negativas de preços e taxas não tornariam o investimento inviável facilmente.

O aterro de Sabará mostrou uma alta atratividade econômica, principalmente com a inclusão de um projeto MDL. Os resultados mostram que o projeto é viável com ou sem a obtenção de créditos de carbono A análise mostrou que são necessários preços de comercialização de energia e carbono impraticáveis, e altas taxas de juros para que o projeto se torne inviável.

Com os resultados, concluí-se que o porte do aterro é fator chave nestes projetos. Outro fator importante é a importância de se instalar o empreendimento de geração de eletricidade nos anos iniciais de operação do aterro, para que seu potencial de geração seja devidamente aproveitado, e assim se obtenham melhores resultados econômicos.

24.4 Avaliação Ambiental

Outro objetivo do P&D 194 foi o de comparar estas alternativas do ponto de vista ambiental, através de uma ACV. Neste item, apresentam-se estes resultados resumidamente. Mais detalhes podem ser encontrados em [19].

O estudo foi conduzido no aterro municipal de Betim (Minas Gerais), situado na região sudeste do país. A cidade possui 441.748 habitantes e produz cerca de 200 toneladas diárias de resíduos urbanos. Os principais dados do RSU gerado no município são mostrados na Tabela XIV a seguir.

O aterro iniciou suas operações em outubro de 1996, e tem fechamento previsto para 2016. Os sistemas de disposição e tratamento do lixo compreendem o aterro sanitário, lagoas de tratamento de chorume (lagoa anaeróbia, reator anaeróbio de fluxo ascendente e lagoa facultativa), e um pátio de compostagem. Ele recebe lixo domiciliar e comercial do município e também os restos de poda e capina. Sendo que os resíduos orgânicos da capina e poda de árvores na cidade, dos restaurantes e das empresas que fazem coleta seletiva, são transformados em material orgânico no pátio.

No trabalho analisaram-se três cenários distintos:

- Cenário 1: Queima direta dos RSU em plantas de incineração de queima em massa com recuperação de energia e seu envio, na forma de eletricidade, para o SIN;
- Cenário 2: O aterro sanitário sem a utilização do biogás, exemplificando o atual estado do aterro de Betim (Cenário Base);
- Cenário 3: Uso do gás de aterro para geração de eletricidade no SIN, utilizando-se como tecnologia os Motores de Combustão Interna (MCI).

As Figuras 8 e 9 abaixo mostram as fornteiras dos cenários considerados na análise

Tabela XIV – Características, composição e histórico de disposição dos RSU no aterro de Betim.

Características		**Componentes**		**Ano**	**tRSU**	**Ano**	**tRSU**	**Ano**	**tRSU**
Umidade [%]	35	Restos de Alimentos	54%	1996	2437	2003	45961	2010	58219
Combustíveis [%]	51	Tecidos	4%	1997	26989	2004	47520	2011	59069
Cinzas [%]	14	Plásticos Diversos	16%	1998	35886	2005	50361	2012	59932
PCS (Base Seca) [kJ/kg]	14610	Borracha	1%	1999	39931	2006	53414	2013	60807
PCI (Base Úmida) [kJ/kg]	7981	Papel e papelão	10%	2000	43857	2007	55742	2014	61695
$C_{fóssil}$ (Base seca) [%]	11	Papelão	3%	2001	43297	2008	56556	2015	62595
$C_{biogênico}$ (Base seca) [%]	17	Rejeitos Vidro e Metais	12%	2002	48880	2009	57382	2016	63509

.

Figura 8 – Limites do Cenário 1 (Incineração).

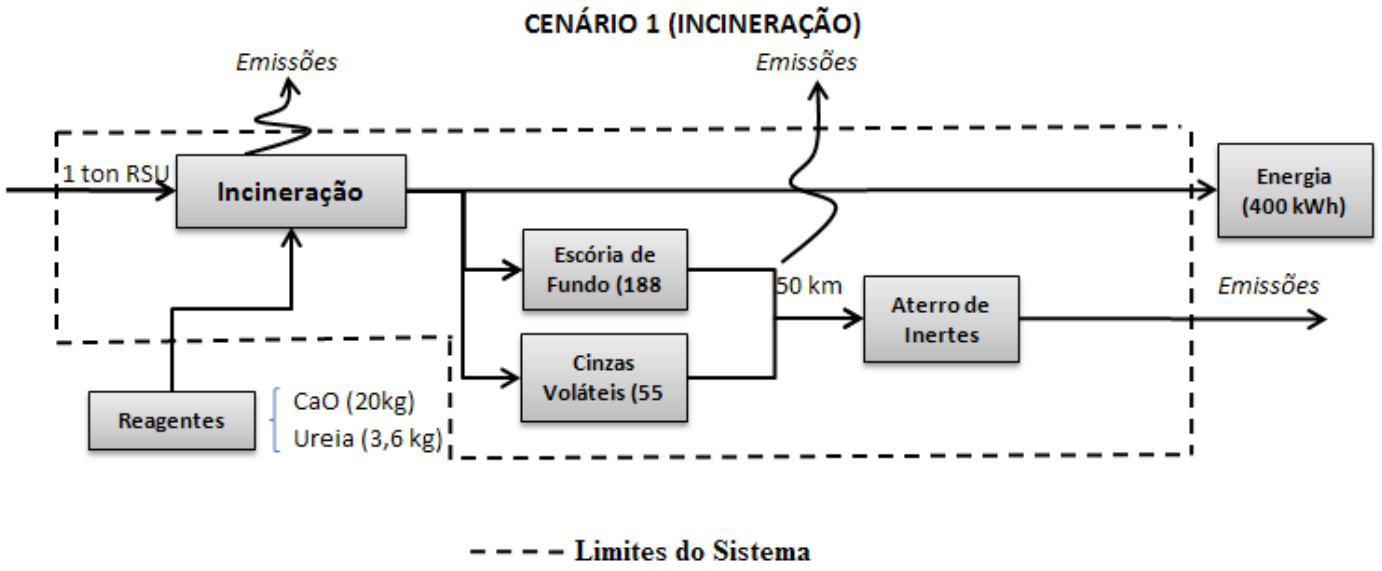
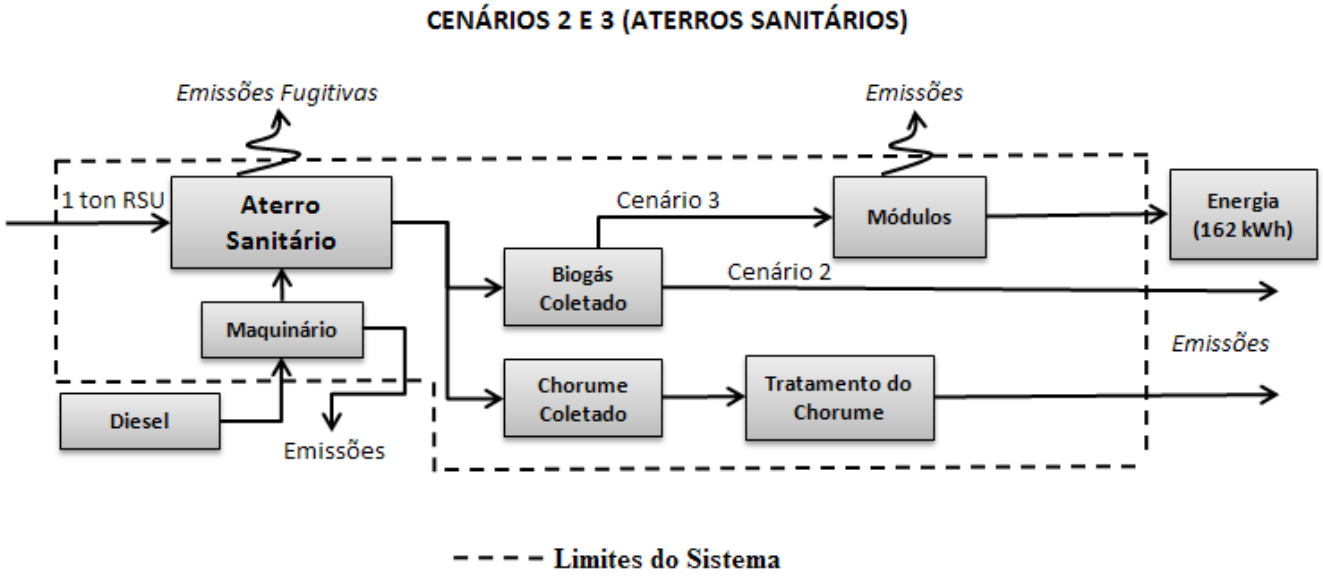


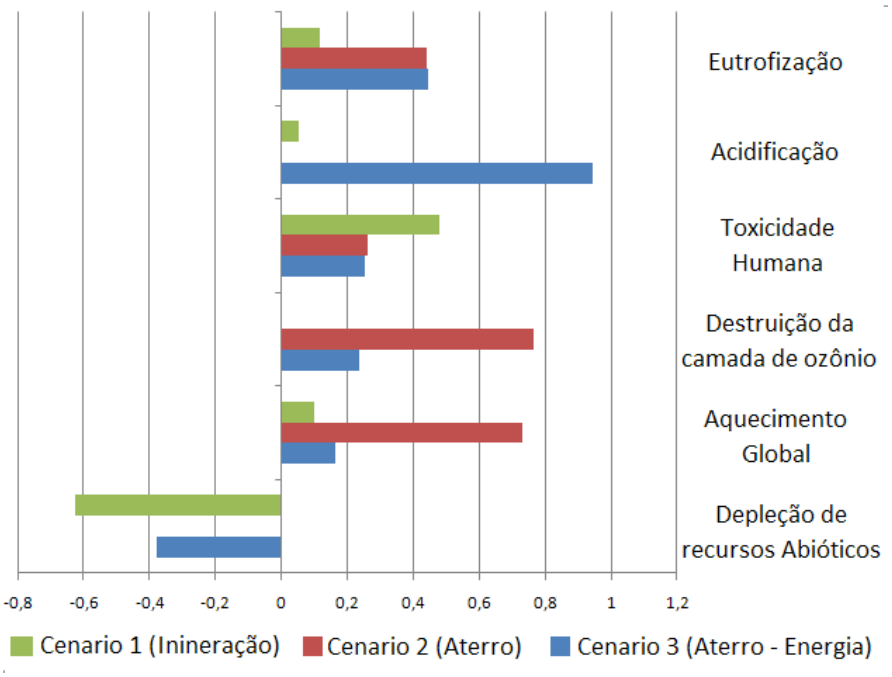
Figura 9 – Limites dos Sistemas nos Cenários 2, 3 e 4, Aterro Sanitário.



O comportamento ambiental destes cenários foi comparado com o uso da ferramenta de ACV, com base na série de normas ISO 14040 [20], prevista como um dos instrumentos de gestão no projeto de lei que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, recentemente sancionada pelo presidente da república.

Foram analisadas as seguintes categorias de impacto ambiental: depleção de recursos abióticos, aquecimento global, toxicidade humana, acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozônio. O que tornou possível a identificação de fatores chave envolvidos nos sistemas considerados e indicar aquele que oferece o melhor desempenho ambiental. Os resultados da pesquisa são resumidamente na Figura 10 adiante.

Figura 10 – Resultados da Avaliação Ambiental.



Na figura acima, quanto maior o resultado da categoria maior é seu potencial de impacto ambiental.

Os resultados, que podem ser estendidos às grades cidades brasileiras, mostram que os aterros sanitários são a pior opção para o gerenciamento do lixo urbano e que ganhos ambientais significativos podem ser obtidos com a recuperação energética dos RSU. Apesar das duras críticas contra seu emprego, a incineração mostrou-se a melhor opção entre as estudadas, porém, só obteve este resultado, pois, considerou-se a utilização de um eficiente sistema de controle de efluentes atmosféricos capaz de cumprir com os padrões de emissão estabelecidos pela legislação. O uso do gás de aterro para geração de eletricidade diminuiu significantemente os

impactos ambientais em relação ao cenário base e, portanto, é uma ótima opção para se reduzir impactos no curto prazo, considerando-se que os aterros são predominantes no país.

24.5 Conclusões

A principal dificuldade para se atingir os objetivos do projeto foi a resistência dos gestores dos aterros sanitários em ceder informações ao estudo. O que ocorre em razão dos problemas sociais, políticos e ambientais envolvidos nestes locais. Outra dificuldade, em relação à incineração, se deve ao fato de inexistir tal tecnologia no país, portanto teve-se de obter grande parte das informações em outros países, o que não é o ideal para abordagens econômicas e ambientais, pois, por maior cuidado que se tenha, acaba-se diminuindo o peso do contexto brasileiro nos resultados.

A incineração dos RSU ainda é mal vista no país. Do pouco encontrado nas referências nacionais sobre o assunto, muito está fundado nos antigos dogmas da incineração com foco na falta de controle da poluição atmosférica, problema há anos superado nos países que utilizam a tecnologia. Este estudo mostrou que esta opção pode ser levada em conta como alternativa aos aterros desde que tecnologias de recuperação energética e de controle de efluentes atmosféricos sejam incluídas.

Esta análise não levou em conta a separação e a reciclagem do lixo, opções de enorme importância ambiental e social. Deste modo, é importante ressaltar, que a gestão dos RSU deve sempre levar em conta a "hierarquia do lixo" onde a seguinte ordem de prioridade deve ser respeitada: a diminuição dos resíduos, sua reutilização, e finalmente na reciclagem dos materiais e da energia nele contido.

O fato é que os aterros recuperam nada ou pouca energia se comparados aos incineradores, e ainda dispersam grande parte do RSU em pequenos locais de despejo onde a recuperação energética do biogás e o controle ambiental é inviável. Esta opção gera um fardo incalculável as futuras gerações e os resultados de ACVs no mundo tem mostrado que ela deve ser considerada como ultima opção, apenas para dispor o que resta dos resíduos após este ser submetido à hierarquia apresentada acima.

Para se atingir resultados mais sólidos, neste estudo, avaliaram-se apenas as opções mais comuns para se gerar energia com o lixo e as quais podem ser facilmente aplicadas no país, pois, delas pode-se obter informações com maior qualidade, o que influiu diretamente na confiança dos resultados. Além delas existem diversas opções, como a utilização de combustível derivado de resíduos e a gaseificação, as quais podem ser objeto de futuros estudos na área.

Capítulo 25

Capítulo 25: Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico[25]

***Resumo*- Os resíduos cada vez mais têm sido tratados na busca de um maior aproveitamento energético e ambiental. No setor elétrico, os resíduos poliméricos decorrentes das atividades de operação e manutenção, se apresentam como uma opção de matéria-prima para processos de pirólise. Este processo realiza a quebra térmica dos compostos presentes no material polimérico, podendo produzir combustíveis ou insumos químicos. Este artigo relata o desenvolvimento do P&D Cemig GT 416, onde se caracterizou os resíduos e se desenvolveram dois protótipos para processamento de resíduos poliméricos e suas misturas (*Blends*). Os resultados, decorrentes da construção de protótipos e análise físico-química, indicam que se trata de uma tecnologia promissora, com possibilidades de uso inclusive além do setor elétrico.**

25.1 Introdução

O setor elétrico gera uma grande quantidade de resíduos à base de polímeros em suas atividades de operação e manutenção, tais como cruzetas de polietileno, luvas, mantas, capacetes, lacres, botas de segurança e pneus de sua frota de veículos. Esses resíduos, além de serem compostos de diferentes polímeros, podem conter outros materiais que impedem ou dificultam sua reciclagem direta, como metais, cerâmicas e impurezas como poeira, óleos e graxas.

A ideia de que resíduos são insumos para novos processos de transformação tem ganhado força nos últimos anos. Primeiramente em decorrência de questões de segurança energética, com a possibilidade de escassez do petróleo. Em seguida pela percepção de que, além de energeticamente aplicáveis, os resíduos podem impactar na eficiência dos processos, agregando também renda e valor. E mais recentemente, pela necessidade de destinação ou tratamento adequado ao resíduo de forma ambientalmente correta.

A pirólise é um processo de decomposição térmica controlada de materiais poliméricos ou orgânicos (biomassa). Este processo tem como característica principal a ausência de oxigênio durante a decomposição. Como exemplo, o carvão vegetal, largamente utilizado em indústrias siderúrgicas brasileiras, é produzido pela pirólise de madeira de eucalipto.

A chamada pirólise rápida, que se caracteriza por menores tempos de residência da biomassa no reator e maiores temperaturas reacionais, produz um teor maior de

[25] MADUREIRA, A. J. V.; MENDES, B. da S. A.; TORRES, É. S.; GOMES, J. P. M.; COSTA, L. C. M.; SILVA, C. H. F. da. Publicado em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2013, Rio de Janeiro.

líquido. Esse líquido, preto ou castanho, é chamado bio-óleo e pode ser refinado para dar origem a uma série de produtos químicos. A pirólise rápida e a utilização do bio-óleo para a síntese de combustíveis ainda estão na fase de desenvolvimento, para a obtenção de maiores rendimentos e pureza de produtos [2].

Neste contexto surgiu o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) nº 416 no âmbito do Programa de P&D Cemig/Aneel (Código Aneel: PD-4591-0416/2010). O objetivo principal do projeto foi o desenvolvimento de um processo para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos em combustíveis para uso em motores geradores móveis ou estacionários. Este projeto foi finalizado em Novembro de 2012 e resultou da parceria entre a Cemig GT e a Verti Ecotecnologias, tendo a Cemig D como empresa cooperada.

Como principal produto do projeto encontra-se a construção 2 protótipos (2-20kg e 100-500kg) que utilizam o processo desenvolvido ao longo da pesquisa.

A principal aplicabilidade para a Concessionária de Energia está na destinação adequada para os resíduos poliméricos decorrentes de suas atividades, bem como na possibilidade de produção de combustíveis líquidos e gasosos. Estes combustíveis podem ser utilizados para a produção de eletricidade através de motores a combustão interna estacionários. Existe também a possibilidade de exploração de patentes e royalties decorrentes do desenvolvimento da pesquisa, abrindo inclusive a possibilidade de outras aplicações para destinação de resíduos poliméricos, além do setor elétrico.

25.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Pirólise

A produção de insumos químicos é uma importante aplicação da pirólise. As primeiras aplicações desse processo, utilizando carvão de madeira, ocorreram em torno de 4000 a.C., tendo como propósito a redução de minério de ferro [1].

A Figura 1 localiza a pirólise como processo termoquímico de transformação. Hoje é possível visualizar novos conceitos de biorrefinarias de óleos de pirólise. A figura a seguir apresenta algumas opções que estão sendo testadas na obtenção de produtos do bio-óleo, conforme é indicado na Figura 2 [3]. É importante destacar que a rota de pirólise trata-se de uma tecnologia de convergência para aproveitamento energético e também de transformação e processamento químico, onde a definição da utilização será dada pelos aspectos econômicos e financeiros de cada uma das opções.

Figura 1 – Pirólise dentre as tecnologias de termoquímicas.

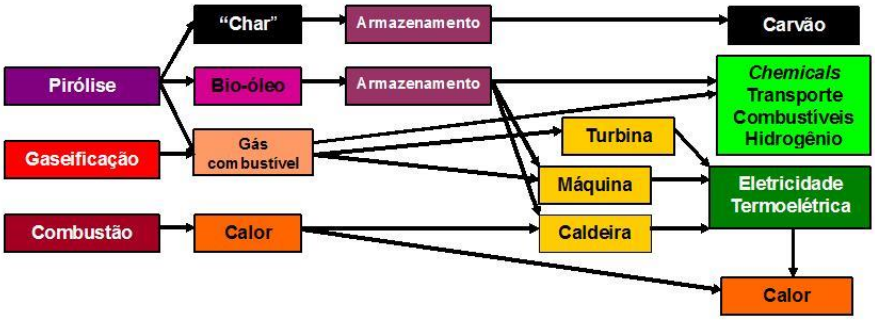
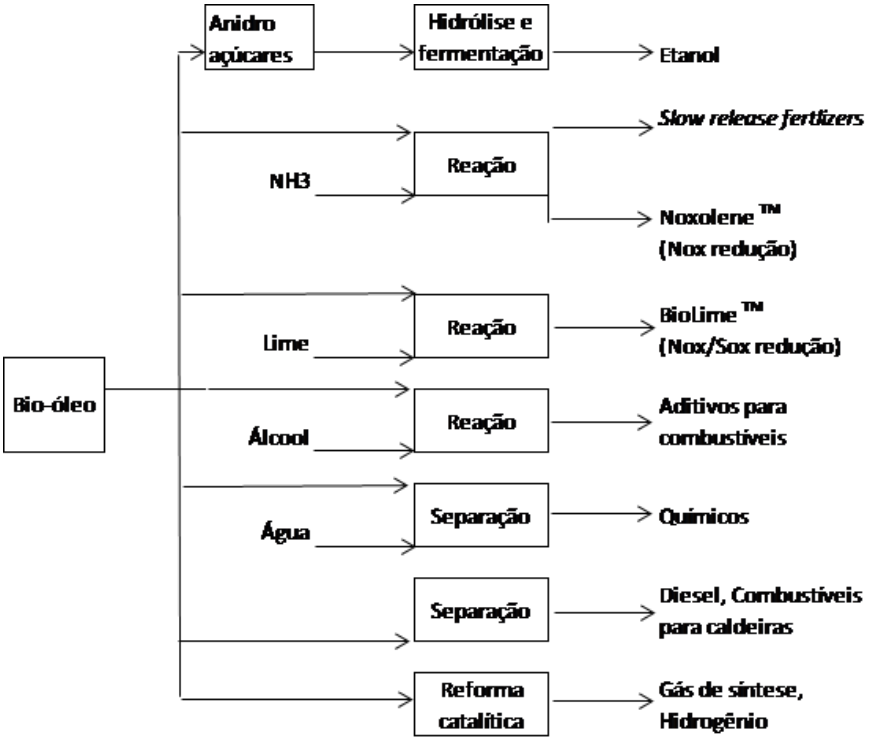


Figura 2 – Produtos energéticos de pirólise, dentro do contexto de biorrefinarias.



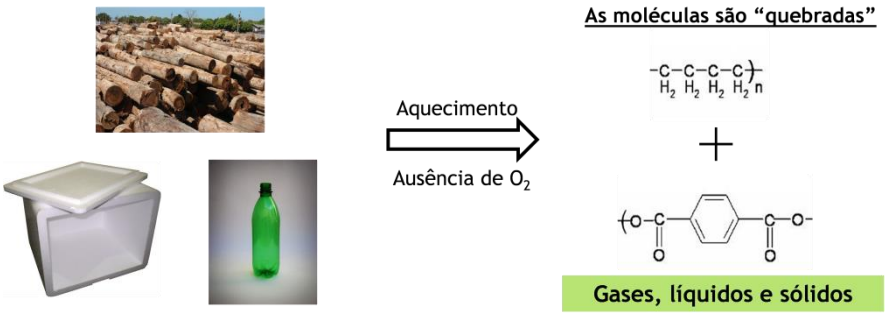
Como grandes vantagens da pirólise estão:

- Principal produto, o bio-óleo, é um liquido cujo refinamento pode dar origem a diversos produtos químicos;
- Um subproduto, o carvão, possui importância química e energética;
- Energeticamente autossuficiente (sem necessidade de energia externa);
- Baixas emissões se comparado à utilização de combustíveis fósseis;

- Flexibilidade do processo e dos produtos;
- Útil para produzir calor.

A decomposição térmica da biomassa basicamente resulta em: carvão (12-15%), bio-óleo (60-70%) e gás (13-25%). A fração gasosa, semelhante ao GLP ou gás natural, pode ser utilizada para manter o processo térmico da pirólise, atuando para a favorabilidade energética do processo. A fração sólida, considerando as características do carvão produzido, a depender das condições de operação da pirólise, possui qualidades para uso na forma de carvão vegetal ou de carvão ativado, devido a sua alta porosidade e área superficial. A Figura 3 ilustra a pirólise e seus produtos.

Figura 3 – Ilustração de um processo de pirólise e seus produtos.



O material líquido formado pelo processo de pirólise é o principal alvo deste trabalho, uma vez que apresenta características que podem torná-lo um combustível alternativo ao diesel. Entretanto, o bio-óleo produzido não pode ser utilizado diretamente, necessitando passar por um processo de purificação e refinamento de modo a homogeneizar e padronizar a sua composição, evitando assim problemas nos equipamentos. A exceção está nas aplicações de combustão e incineração.

As principais barreiras para a tecnologia de pirólise são:

- *Scale-up* de unidades piloto/bancada com elevados riscos de investimento;
- Falta de legislação específica e, baixos incentivos fiscais;
- Inexistência de medidas de esclarecimentos (político, social e industrial) para melhorar aceitação do produto;
- Barreiras inerentes de um novo produto: controle de qualidade e especificação;
- Necessidade de desenvolvimento de novas aplicações para os produtos;
- Falta de infraestrutura de transporte para os produtos;
- Necessidade de entendimento básico do processo para a ampliação de escala e agilidade nos projetos;

- Necessidade de desenvolvimento para melhoria do rendimento e qualidade do bio-óleo e para a redução de custos (alguns trabalhos reportados na literatura estimam em US$ 41/barril do bio-óleo) [3].

B. Projeto de P&D GT 416

Este projeto foi desenvolvido entre 2010 e 2012 e resultou da parceria entre Cemig GT e Verti Ecotecnologias, tendo um orçamento aproximado de R$1 milhão financiado pela concessionária, sendo R$200.000,00 de contrapartida.

Para a obtenção de uma metodologia de pirólise de resíduos poliméricos e aplicação em unidades experimentais em escala laboratorial e piloto, foram perseguidos os seguintes objetivos específicos:

- Mapeamento dos resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico da Cemig, incluindo a identificação dos principais tipos de resíduos, suas quantidades e características físico-químicas;
- Estudo, em laboratório, do craqueamento térmico dos diferentes resíduos, realizando a caracterização dos produtos líquidos, gasosos e sólidos obtidos;
- Estudo, em laboratório, do craqueamento térmico dos diferentes *Blends* de resíduos, realizando a caracterização dos produtos líquidos, gasosos e sólidos obtidos;
- Dimensionamento, construção e operação do Protótipo 1 (planta para 2-20 kg de resíduos poliméricos) para verificação dos parâmetros relevantes (cinética de reação, transferência de massa e de calor, definição dos equipamentos necessários, questões de segurança, dentre outros);
- Dimensionamento, construção e operação do Protótipo 2 (planta para 100-500 kg de resíduos poliméricos) para o levantamento de informações relevantes para o projeto industrial.

A metodologia realizada é descrita a seguir:

- Especificação e definição das análises a serem realizadas;
- Estudo e caracterização físico-química dos resíduos poliméricos gerados na Cemig GT;
- Pirólise individual dos resíduos poliméricos e análise físico-química dos produtos gerados;
- Pirólise de *Blends* dos resíduos poliméricos e análise físico-química dos produtos gerados;
- Elaboração, instalação e operação do Protótipo 1 (2-20kg);
- Elaboração, instalação e operação do Protótipo 2 (100-500kg).

Ao longo do trabalho foram realizadas reuniões de acompanhamento do projeto e para a tomada de decisão. Anualmente foram realizados seminários de transferência tecnológica e apresentação de resultados.

A seguir, de forma apenas ilustrativa, serão apresentados os resultados que sintetizam os desenvolvimentos realizados dentro do projeto. Todo o desenvolvimento, análises e cálculos encontram-se na documentação do projeto na Cemig GT.

C. Estudo e caracterização físico-química dos resíduos poliméricos [4]

Foi realizado o estudo térmico e de composição dos principais resíduos poliméricos da Cemig, de forma a gerar parâmetros e informações técnicas que possibilitem seu uso como matéria prima para a produção de um combustível alternativo através do processo de pirólise.

A caracterização ocorreu a partir do levantamento de informações da composição dos resíduos e do estudo de seu comportamento térmico determinado pela análise termogravimétrica (TG e DTG). Além disso, foram realizadas as análises: análise diferencial térmica (DTA), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS).

Primeiramente, amostras de resíduos poliméricos foram coletadas no Centro de Resíduos do Jatobá, da Gerência de Logística e Administração de Material - LI/LA da Cemig Distribuição S.A, localizado no bairro do Barreiro na cidade de Belo Horizonte, MG.

Os materiais coletados para os estudos foram originados do descarte de EPI's, materiais para manutenção e sinalização da rede elétrica. Os materiais selecionados para estes estudos, ilustrados na Figura 4, foram:

- Lacres Moídos;
- Luvas pretas e amarelas;
- Mantas;
- Tubo com fibra de vidro para manutenção de rede;
- Esferas de sinalização;
- Lençol e cobertas;
- Isoladores de polímeros;
- Cavalo marinho;
- Fita arco barril Pet reciclado;
- Cruzeta;
- Cone de sinalização;
- Capacete.

Figura 4 – Fotos de alguns dos resíduos utilizados.

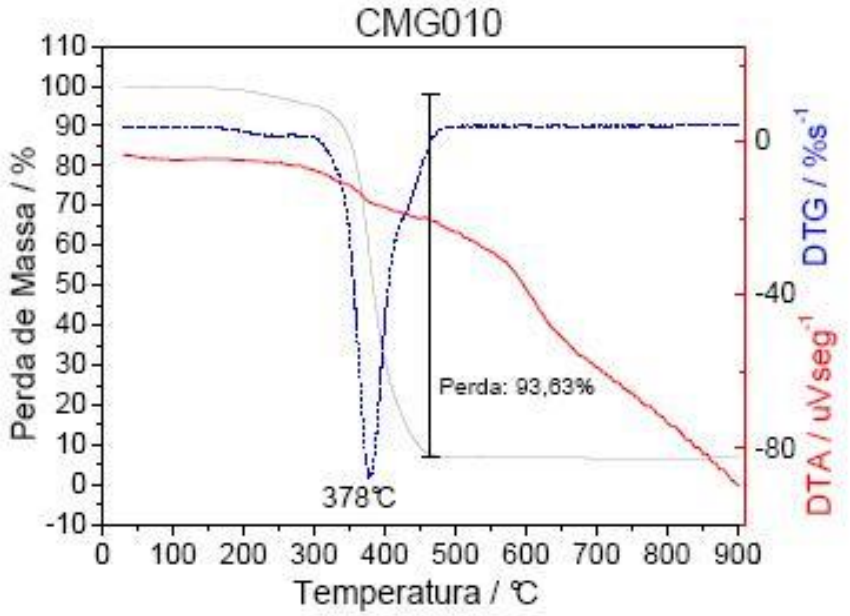
Inicialmente as amostras foram classificadas e agrupadas segundo informações técnicas obtidas através do documento interno da Cemig gerado pelo Conem (Comissão de Normalização de Materiais e Equipamentos Eletromecânicos), chamadas Fichas Conem. As fichas dão informações sobre a composição do resíduo e outras informações técnicas e, segundo elas, a maioria dos materiais eram compostos por:

- Polietileno;
- Polipropileno;
- Policloreto de vinila;
- Poliéster e poliuretano.

O perfil térmico dos materiais foi obtido através da técnica de termogravimetria (TG). De forma simplificada, ela mede a perda de massa, por decomposição térmica, de um material em função da variação da temperatura, o que permite determinar a faixa de temperatura na qual o processo de pirólise deve ser realizado.

A Figura 5 mostra um exemplo de curvas TG/DTG e DTA para um dos materiais estudados.

Figura 5 – Curvas TG, DTG e DTA da amostra de Luvas Pretas e Amarelas.



As curvas de perda de massa TG/DTG, para a amostra de resíduos de luvas pretas e amarelas, mostram perda de massa de aproximadamente 90% na faixa de temperatura de 200-475 ºC, sendo que a maior perda ocorre à temperatura de 378ºC. Não ocorrem perdas significativas para temperaturas superiores, resultando em uma massa de resíduo de 10%. A curva DTA mostra que todos os fenômenos são endotérmicos, indicando que é necessário o fornecimento de energia durante todo o processo de pirólise para este material.

Em função da similaridade da composição dos materiais estudados, conforme informações fornecidas pela ficha Conem, e do comportamento térmico registrado nas curvas TG, foi possível agrupá-los. Na Figura 6 observa-se curvas TG de 4 materiais que apresentam em sua composição polietileno e látex e que apresentam comportamento térmico similar.

A tabela 1 apresenta os valores de temperatura e perda de massa para os diversos grupos formados pelas amostras de resíduos poliméricos. A temperatura indicada na tabela mostra a temperatura média em que ocorre a perda de massa mostrada nas curvas TG.

Figura 6 – TG Materiais de Polietileno/Látex.

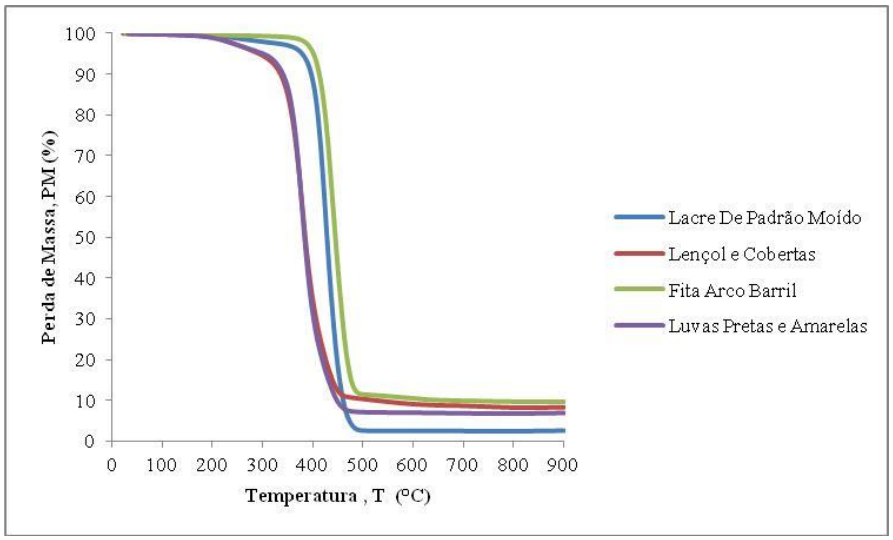
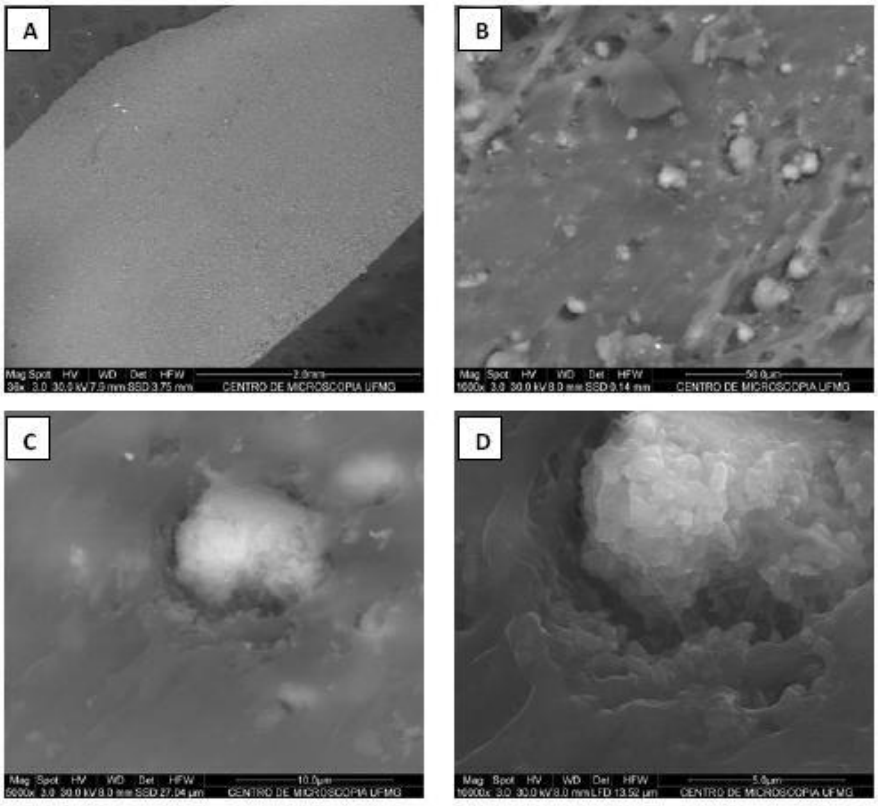


Tabela 1 – Grupos dos Resíduos.

Grupo	Temperatura Média do processo/ ºC
Fibrosos	378
Polietileno/Polipropileno	448
Polietileno/Látex	401
Reforçado com Fibra	387
Borracha Flexível	328
Lacre Padrão	547
Poliuretano	272
PVC	275
Lençol Isolante	407

Na Figura 7 é apresentado um exemplo de análise de MEV realizado para a amostra de cone de sinalização.

Figura 7 – MEV para amostra de cone de sinalização.

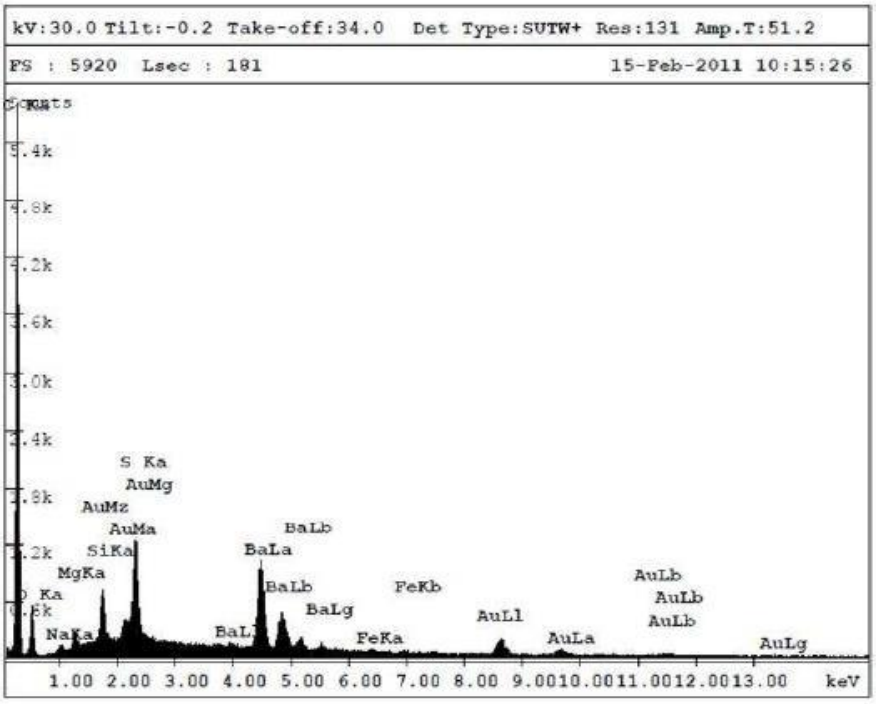


Na Figura 7A, com um aumento de 36 vezes, permite-se observar relativa homogeneidade no material, superfície lisa, sem poros ou imperfeições. Na Figura 7B, com aumento de 1000 vezes, observa-se alguns pontos de imperfeição. Na Figura 7C, com aumento de 5.000 vezes, é detalhada uma região que apresenta partículas na superfície e também imersas, identificadas como óxidos metálicos usados como carga inorgânica em materiais poliméricos. Finalmente, na Figura 7D, com um aumento de 10.000 vezes, é confirmada a observação da imagem anterior, com mais riqueza de detalhes. Estas partículas possuem dimensão da ordem de 1-5 μm [4].

Numa análise geral dos conjuntos de resultados de espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS), os espectros mostram a presença de vários metais nas amostras. Alguns destes metais como: ferro, cálcio, titânio e zinco, podem ter impacto positivo no processo de pirólise devido suas propriedades catalíticas. Por outro lado, existem elementos que podem agir como inibidores reacionais ou provocar a formação de substâncias tóxicas, como é o caso dos organoclorados. Na Figura 8 é

apresentada uma análise EDS para uma amostra de capacete, onde se observa a presença de metais como: magnésio, sódio, ferro, bário e ametais, como: enxofre e silício, sendo que todos estes elementos apresentam sinais de baixa intensidade.

Figura 8 – Caracterização dos metais presentes em amostra de capacete por análise EDS.



Dos resultados gerais das análises das amostras, foi verificado que a maioria dos materiais tem polímeros como o Polietileno e Polipropileno como principais constituintes, o que permite a aplicação do processo de pirólise. Também foi verificado que o intervalo médio de perda de massa, obtido pelas curvas TG, está em uma faixa que permite a realização da pirólise em temperaturas relativamente baixas, diminuindo a exigência energética do processo. Outro ponto importante foi a verificação da similaridade de comportamento entre os resíduos analisados. Sob o ponto de vista industrial, esse comportamento é vantajoso, uma vez que o tratamento isolado de cada um dos resíduos poderia representar um acréscimo considerável de custo e complexidade de operação.

D. Pirólise de resíduos poliméricos do setor elétrico em escala laboratorial [5]

Na Figura 9 é apresentado o arranjo para a realização da pirólise dos materiais poliméricos e as suas misturas (Blends).

O material líquido foi obtido através da pirólise realizada no forno indicado na Figura 10.

Figura 9 – Esquemático do sistema de pirólise para análise de produtos: Sistema de pirólise, (A) forno elétrico, (B) reator, (C) termopar para controle de temperatura, (D) condensador dos gases, (E) coletor de líquido e (F) exaustor de gases.

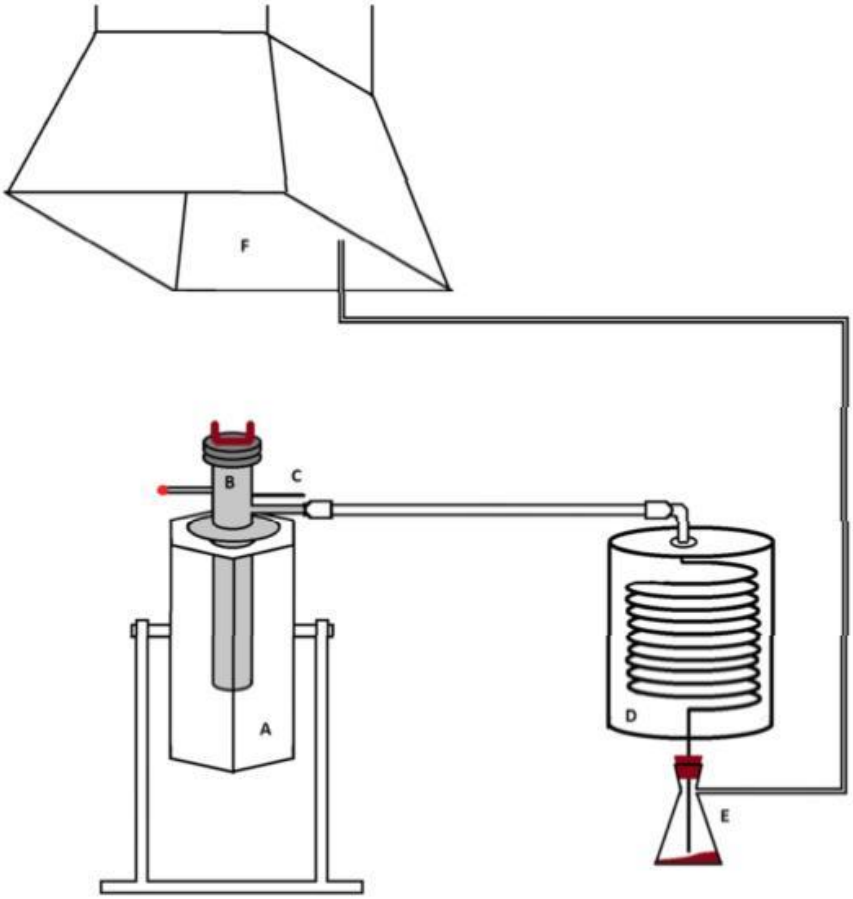


Figura 10 – Pirolisador utilizado para as reações.

Foi adotado o processo de pirólise por batelada. As amostras, previamente trituradas e homogeneizadas, eram colocadas no forno pré-aquecido a 600°C.

A Figura 11 representa o procedimento adotado para a realização das pirólises e na Figura 12 são ilustrados os produtos obtidos.

Figura 11 – Procedimento para a realização das pirólises.

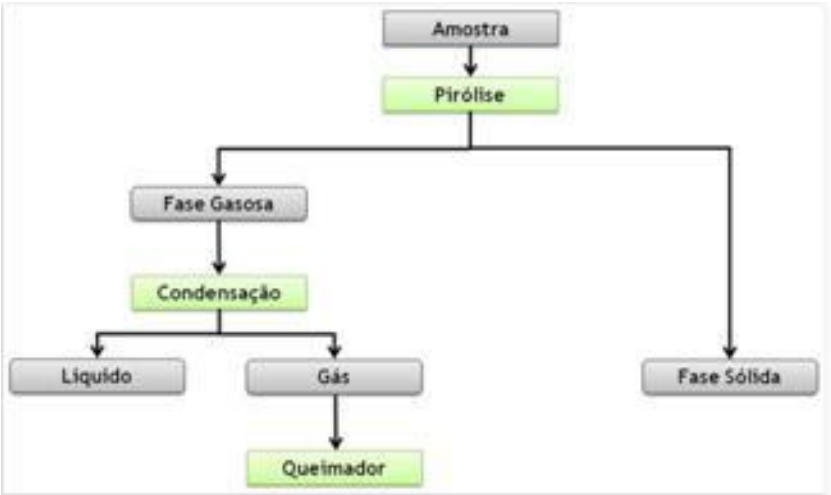
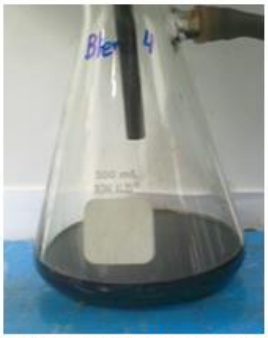


Figura 12 – Fotos dos materiais obtidos.

Material sólido



Material líquido

Material gasoso

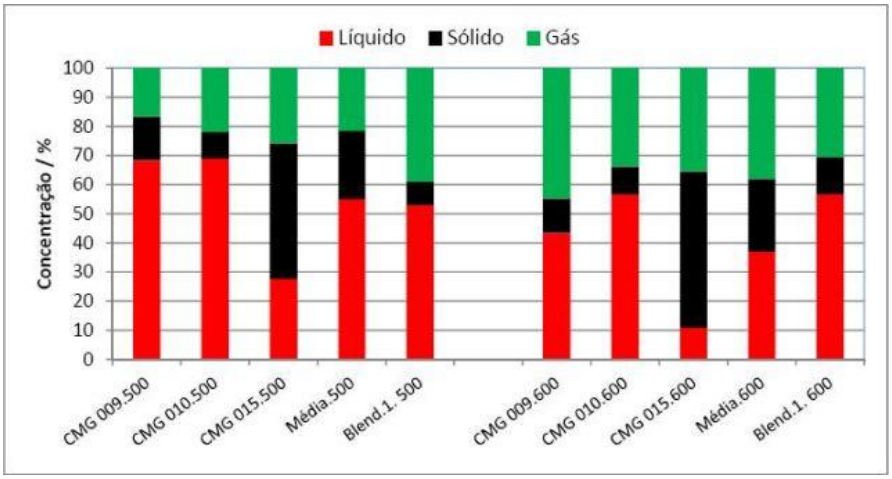
Foram analisadas seis amostras formadas a partir da mistura dos resíduos poliméricos da Cemig. Estas amostras foram chamadas de blends (Tabela 2) e sua formação foi baseada em função da composição polimérica e do comportamento térmico de seus constituintes.

Tabela 2 – Amostras analisadas.

Amostras	Características
Blend 1	Materiais poliméricos com alto rendimento de produção de líquidos
Blend 2	Materiais fibrosos com alto rendimento de produção de líquidos.
Blend 3	Materiais poliméricos com formação de fração líquida de alta viscosidade e cor amarelada, similar materias parafínicos.
Blend 4	Materiais poliméricos com baixo rendimento na produção de líquido durante a pirólise.
Blend 5	Materiais fibrosos com baixo rendimento de produção de líquidos.
Blend T	Todos os materiais

Na Figura 13 é apresentado um balanço de massa, como exemplo, para o *Blend* 1 nas temperaturas de 500 e 600ºC. O processo a 500°C favorece a produção da fração líquida nos processos aplicados as amostras individuais. Em ambas as temperaturas, a amostra CMG015 gera menor proporção de fração líquida. Já para o *blend*, a temperatura do processo não afeta significativamente o rendimento da fase líquida, ainda que a 600°C esta fração seja ligeiramente superior do que a obtida a 500°C.

Figura 13 – Balanço de massa para amostras individuais e do *Blend*.

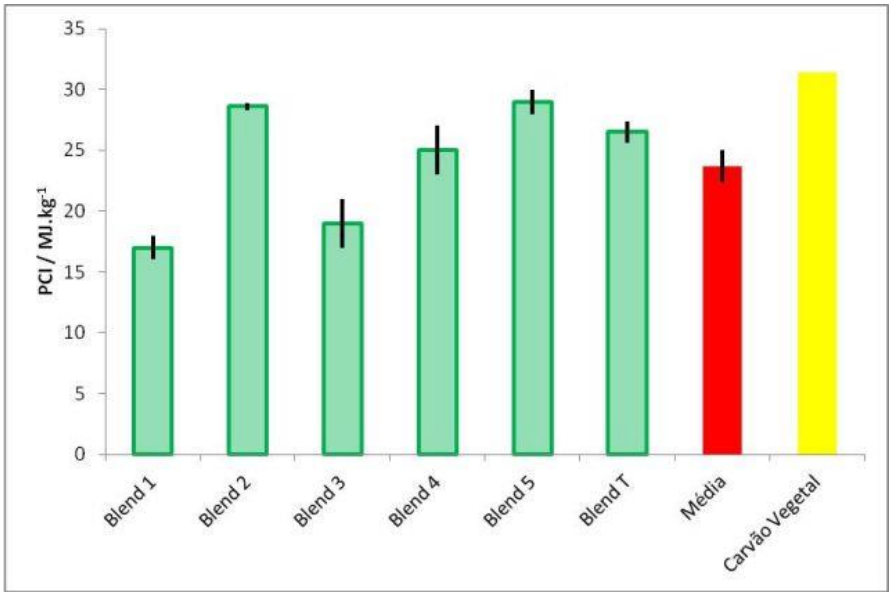


Todos os produtos obtidos a partir da pirólise dos blends formados foram recolhidos e analisados. O PCI (poder calorífico inferior) indica a energia liberada na combustão completa de um quilograma de combustível, estando diretamente ligado ao seu potencial para uso como fonte geradora de energia. A seguir serão discutidos os resultados de PCI dos produtos de pirólise, comparando-se com seus similares comerciais.

A Figura 14 apresenta os resultados da análise PCI para o material sólido. O carvão vegetal foi determinado como parâmetro de comparação para os materiais sólidos. De forma geral, todas as amostras obtidas como produto dos *Blends* tem potencial energético comparável ao do carvão vegetal. Os *Blends* 1 e 3 apresentaram um valor de PCI inferior ao valor apurado para o PCI do carvão vegetal.

A Figura 15 apresenta os resultados da análise PCI para os materiais líquidos. O diesel foi determinado como parâmetro de comparação. De forma geral, todas as frações liquídas obtidas de *Blends* tem potencial energético comparável ao do diesel. Os *Blends* 1 e 3 apresentaram um valor de PCI mais próximo ao valor apurado para o PCI do diesel.

Figura 14 – PCI dos produtos sólidos da Pirólise.



A Figura 16 apresenta, de forma ilustrativa, um cromatograma da fração líquida paa o *Blend* 1. Devido a grande variedade de substâncias que compõe a fração líquida é necessário fazer a leitura em duas colunas cromatográficas diferentes, para garantir a identificação de um número maior de compostos. Na Figura 17 são apresentados os compostos de maior concentração na amostra analisada.

Figura 15 – PCI dos produtos líquidos da Pirólise.

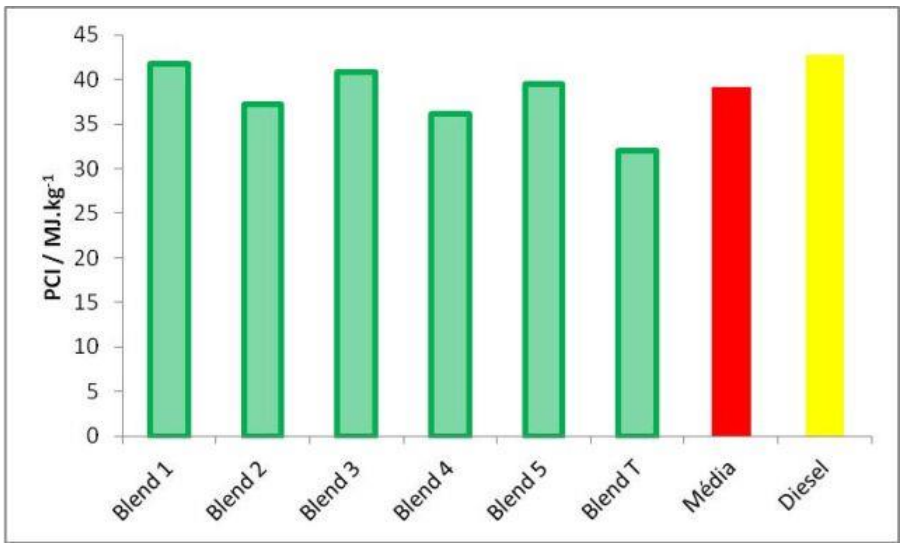


Figura 16 – Cromatograma da fração líquida – *Blend* 1.

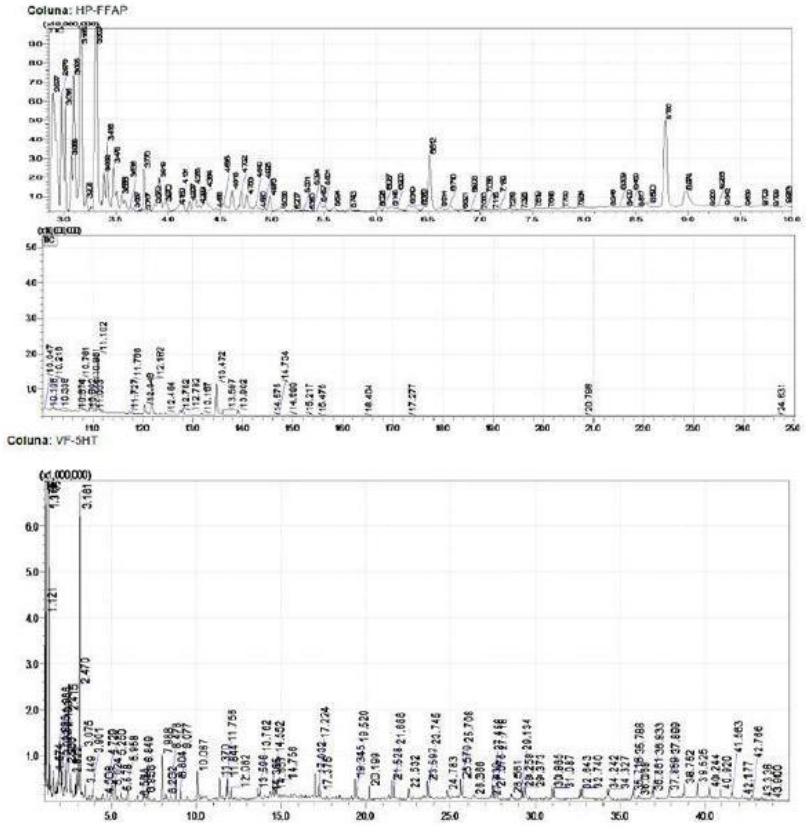
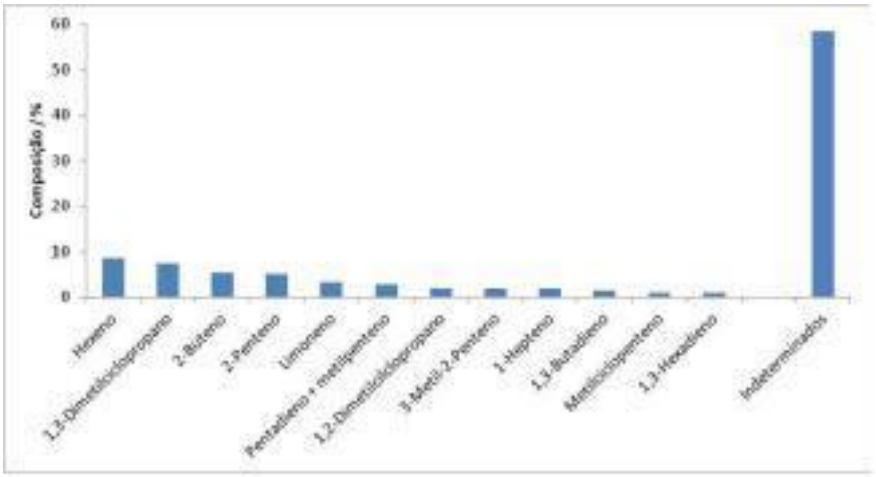


Figura 17 – Compostos de maior concentração – *Blend* 1.



A Figura 18 apresenta o teor de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Nitrogênio (N) da média da pirólise individual dos resíduos comparada com os valores dos respectivos *Blends*.

A Figura 19 apresenta os resultados da análise PCI para o material gasoso. O gás natural foi determinado como parâmetro de comparação para os materiais gasosos. De forma geral, todas as frações liquídas obtidas de *Blends* tem potencial energético comparável ao gás natural. Contudo, os *Blends* 4, 5 e T apresentaram valores de PCI superiores ao do gás natural.

A partir da análise do PCI dos produtos da pirólise de resíduos poliméricos, é possível perceber que todos os materiais estudados possuem potencial energético para serem utilizadas como fontes energéticas.

Figura 18 – Teor de C, H e N da pirólise das médias dos materiais individuais e os *Blends* de todas as etapas.

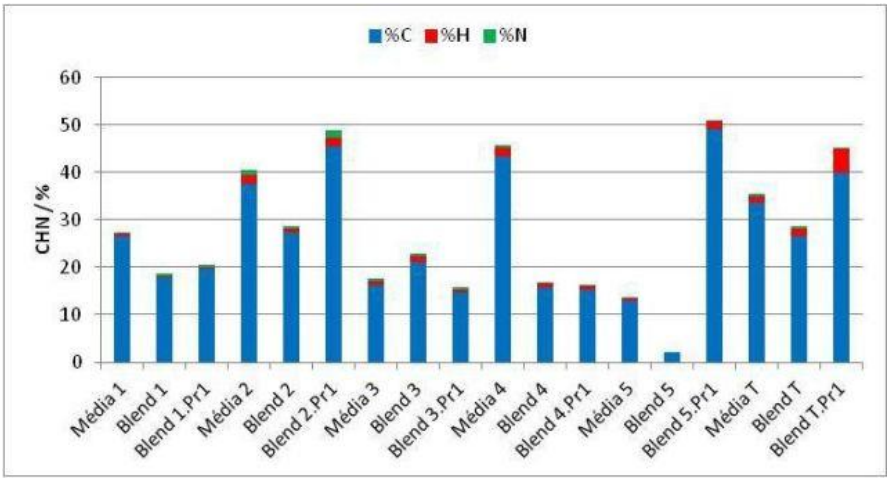
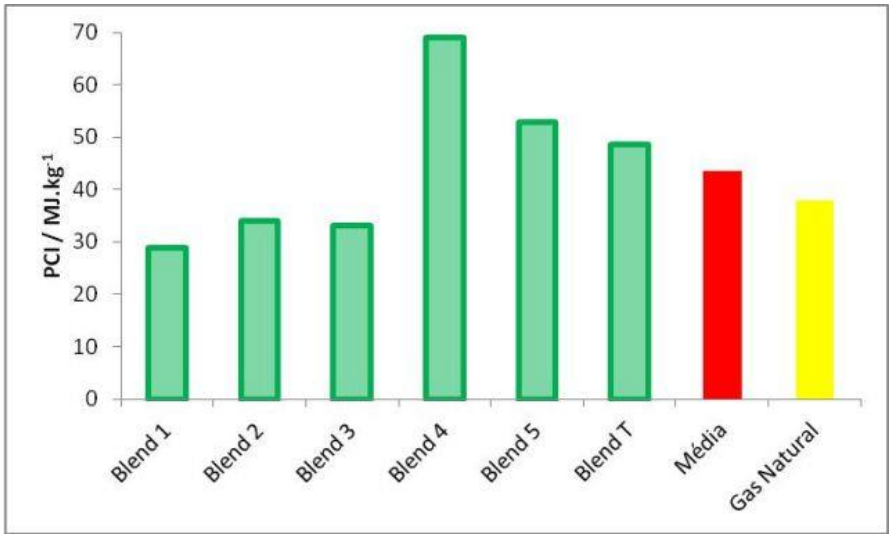


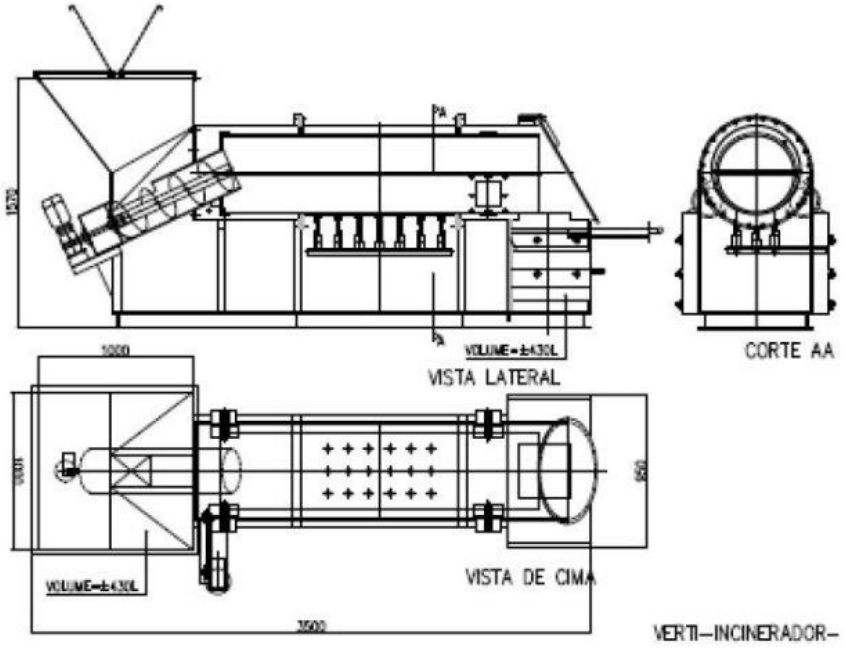
Figura 19 – PCI dos produtos gasosos da Pirólise.



E. Protótipo piloto de pirolise de resíduos poliméricos [6]

Diante dos resultados obtidos para a pirólise em escala laboratorial e do Protótipo 1, foi realizado o dimensionamento e construção do Protótipo 2 (Figura 20).

Figura 20 – Croqui do Protótipo 2.

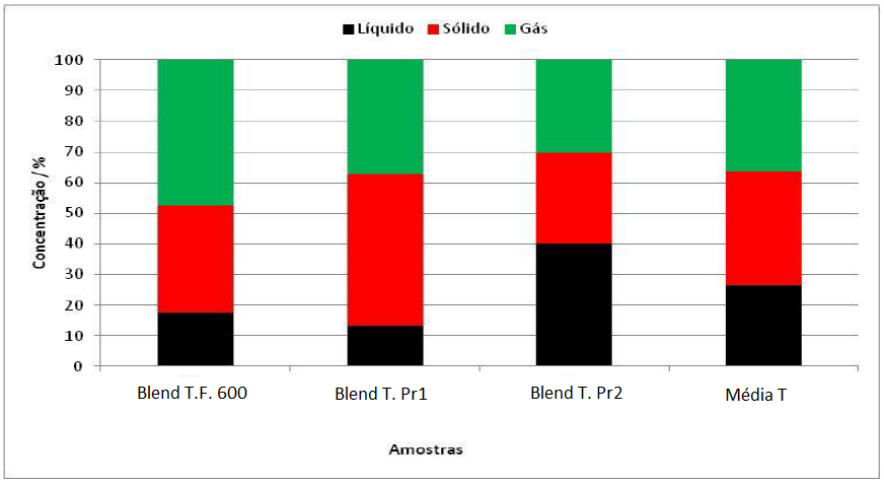


O Protótipo 2 foi projetado para operar em regime contínuo, diferentemente do processo utilizado nas etapas anteriores, onde constatou-se que a operação por batelada trazia prejuízos para a vedação do equipamento, para a homogeneidade das amostras e demandava maior tempo de operação.

A pirólise foi realizada à pressão ambiente com temperatura reacional de 600°C. As frações sólida, líquida e gasosa originadas foram coletadas e analisadas. Todos os experimentos realizados no Protótipo 2 utilizaram apenas o *Blend T* (composto por todos os resíduos estudados ao longo do projeto) . Desta forma foi possível reduzir o tempo de preparação de amostras, tornando o processo mais rápido.

A Figura 21 mostra uma comparação entre o balanço de massa das frações sólida, líquida e gasosa do *Blend T.F.600* (realizado na etapa laboratorial), *Blend T.Pr1* (realizado no Protótipo 1), *Blend T.Pr2* (realizado no Protótipo 2) e da média de todas as amostras estudadas.

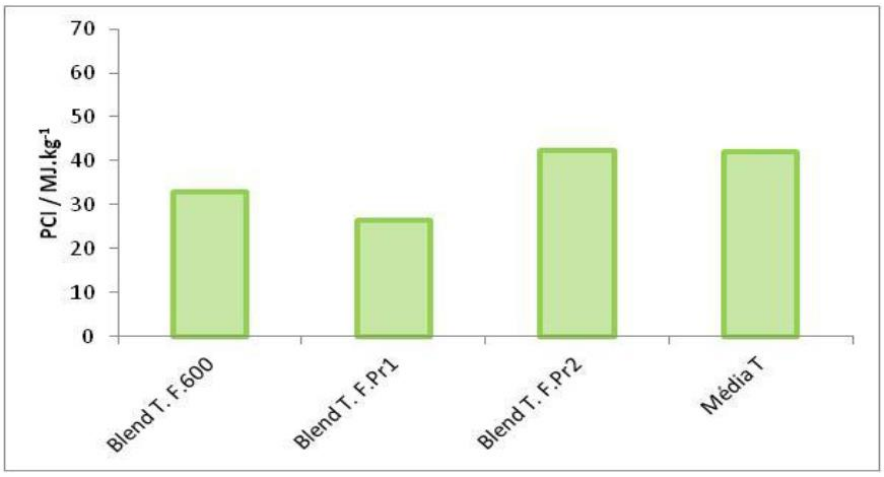
Figura 21 – Gráfico comparativo do balanço de massa do *Blend T* nos diversos equipamentos desenvolvidos.



Comparando-se os balanços de massa, é possível verificar que a maior quantidade de massa, proporcionada pelo ganho de escala entre os equipamentos desenvolvidos, provocou uma diminuição da fração gasosa gerada e uma maior formação da fração líquida.

Os valores do PCI para as frações líquidas obtidas a partir da pirólise dos *Blend T* nos equipamentos desenvolvidos são representadas na Figura 22.

Figura 22 – PCI para as frações líquidas obtidas nos diversos equipamentos.



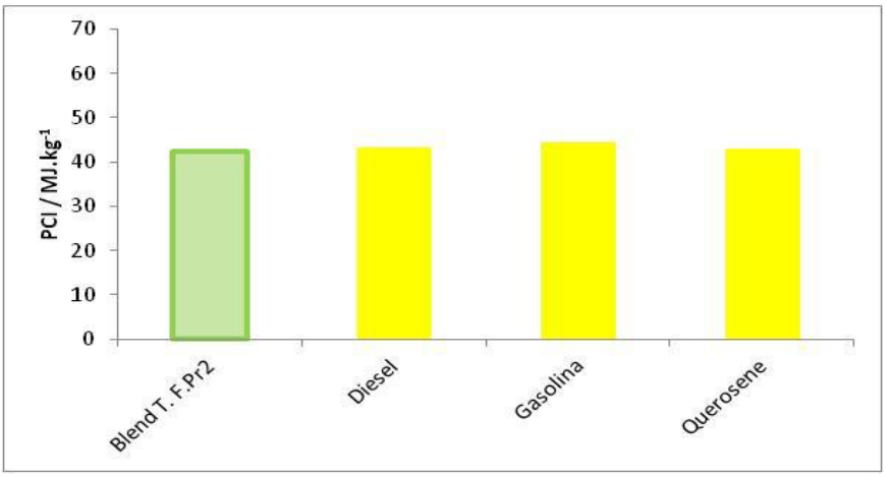
É possível verificar que os valores de energia liberada pela combustão dos produtos pirolíticos são altos. O *Blend* T.Pr2 apresentou o valor de aproximadamente 42 MJ.kg-1 de energia liberada pelo processo de combustão. Sendo assim, o Protótipo 2 foi o equipamento que produziu a fração líquida com maior valor de PCI.

O critério utilizado para verificação da qualidade do combustível gerado pela pirólise foi a comparação com os valores de PCI dos combustíveis disponíveis comercialmente. A Figura 23 mostra a comparação entre os valores de PCI para o produto da pirólise obtido no Protótipo 2 e os combustíveis comerciais.

O valor de PCI das frações líquidas do produto do *Blend* T está próximo dos valores do PCI do diesel. A energia liberada pela queima do liquido pirolítico representa, aproximadamente, 97% do valor da energia liberada pela queima do diesel.

Os resultados alcançados indicam que os resíduos estudados podem ser utilizados no processo de pirólise com aproveitamento energético dos produtos formados. Tal aplicação possui um apelo ambiental muito grande, contribuindo significativamente para a solução de questões ambientais. Outras possibilidades de benefícios que podem ser citadas são: desenvolvimento de nova opção de negócio para a concessionária de energia, formação de mão-de-obra qualificada e fomento para o desenvolvimento industrial e de novos equipamentos.

Figura 23 – Comparação de PCI dos combustíveis comerciais e o *Blend T.Pr2*.



25.3 Conclusões

O assunto pirólise de biomassa ou de polímeros tem surgido como uma opção de fornecimento de combustíveis e de produtos químicos. Este projeto se constituiu em uma oportunidade de investigar esta tecnologia, suas barreiras e limitações.

Através do desenvolvimento do projeto, foi possível entender e caracterizar o resíduo polimérico gerado nas atividades da Empresa. Foi verificado que os principais constituintes dos materiais estudados são o Polietileno e Polipropileno, resultando em comportamento térmico semelhante e possibilitando estabelecer grupos de materiais (*Blends*). Sob o ponto de vista industrial, esse comportamento é positivo, uma vez que o tratamento isolado de cada um dos resíduos poderia representar um acréscimo considerável de custo e complexidade de operação.

A realização do processo de pirólise em escala laboratorial permitiu a caracterização de produtos que expressam a potencialidade energética de seu uso. Estes estudos direcionaram a construção dos protótipos em escala piloto. Os resultados obtidos nos protótipos não apresentaram mudanças significativas em relação à escala laboratorial, mostrando a viabilidade do processo quando em maiores escalas.

A Verti Ecotecnologias teve, com esse projeto, condição de se capacitar e se consolidar como uma empresa de desenvolvimento tecnológico.

A Cemig GT pôde avaliar a destinação de seus resíduos poliméricos e também a aplicação da tecnologia de pirólise para o suprimento de combustível para geração distribuída, além de capacitação tecnológica que lhe permite se posicionar estrategicamente sobre o assunto. Como sugestão de trabalhos futuros, encontra-se o desenvolvimento de um projeto, em escala industrial, para pirólise de resíduos em geral e também testes de unidades de pirólise acopladas a sistemas de geração estacionários de eletricidade, visando o suprimento de comunidades isoladas.

Capítulo 26

Capítulo 26: Desenvolvimento de um sistema de purificação do biogás visando a geração de energia elétrica a partir da metanização da vinhaça.[26]

***Resumo*- A biomassa tem sido apontada como uma importante fonte energética para o crescimento futuro do sistema elétrico brasileiro. Neste contexto os resíduos de processos se apresentam com oportunidades para a produção de eletricidade e para a eficiência energética, como é o exemplo da vinhaça no setor canavieiro. Entretanto existe um importante gargalo tecnológico a ser superado que está associado com a purificação do biogás produzido na biodigestão deste resíduo. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás proveniente da metanização da vinhaça, para viabilizar a geração de energia elétrica a partir deste efluente. Espera-se contribuir para o cumprimento de metas estratégicas de concessionárias e distribuidoras de energia elétrica, pela diversificação da matriz energética do país e fomento ao desenvolvimento da Geração Distribuída baseada na biomassa, ao mesmo tempo em que promove a inserção de tecnologias para eficiência energética na indústria.**

26.1 Introdução

A sociedade moderna tem no consumo de energia um dos seus pilares. O Brasil tem uma vocação para o uso de biocombustíveis e os usos modernos da biomassa juntamente com tecnologias recentes e eficientes tem se mostrado promissores para a disponibilidade e segurança energética do país.

Atualmente o Brasil é o maior produtor de cana de açúcar do mundo e líder nas soluções tecnológicas para produção do etanol. Na safra de 2010/ 2011 foram produzidos no país 27,6 bilhões de litros de etanol. Para cada litro de etanol produzido foram gerados 13 litros de vinhaça, em média, totalizando, nesta safra, 358,8 bilhões de litros deste efluente. Além da massiva produção, a vinhaça possui elevada concentração de matéria orgânica e potássio, sendo um efluente de difícil manejo e disposição. A Figura 1 mostra uma lagoa de disposição de vinhaça [1], [2].

A metanização, além de oferecer uma alternativa de tratamento deste efluente, possibilita a geração de biogás, produto com poder calorífico de 24,93 MJ/ m³, e a geração de biofertilizante líquido, o segundo maior grupo de custos de insumos para a cultura da cana de açúcar [3].

[26] SILVA, C. H. F.; COLTURATO, L. F. D. B. ; SOUZA, L. C. Publicaod em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

Figura 1 – Lagoa comumente utilizada para disposição da vinhaça.

Entretanto, a geração de eletricidade a partir do biogás oriundo da metanização da vinhaça depende de tecnologia que possibilite a remoção do sulfeto de hidrogênio (10.000 a 20.000 ppmV) do biogás, derivado do processo de sulfitação na produção de açúcar ou pela adição de ácido sulfúrico nas domas de fermentação. O sulfeto de hidrogênio (H_2S) deve ser removido por causar corrosão de componentes metálicos, acidificação do óleo dos motores de cogeração e se converter em óxidos de enxofre após a queima. Para geração de eletricidade, faz-se necessária a remoção do H_2S a níveis inferiores a 500 ppmV.

Desta forma surgiu o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) Cemig/Aneel nº 453 (Código Aneel: PD-4951-0453/2011), onde o principal objetivo é projetar e construir uma unidade de dessulfuração para a purificação do biogás com altas concentrações de H_2S, de forma a viabilizar a geração de energia elétrica a partir de plantas de metanização da vinhaça. A tecnologia proposta utiliza-se de processos químicos e biológicos combinados que deverão atingir resultados satisfatórios quanto à remoção do H_2S e regeneração de enxofre elementar (S_0).

A metodologia empregada será a experimentação, definida com base no estado da arte da tecnologia e nos objetivos do projeto.

O projeto encontra-se em execução com término previsto para outubro de 2013. No momento o projeto encontra-se na sua fase construtiva.

26.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. Vinhaça

A vinhaça é o principal resíduo liquido produzido por destilarias de aguardente e de álcool (autônomas ou anexas às usinas de açúcar) quando se efetua a separação do etanol do mosto fermentado. A vinhaça é "uma suspensão aquosa de sólidos orgânicos e minerais, contendo os componentes do vinho não arrastados na etapa de destilação, além de quantidades residuais de açúcar, álcool e componentes voláteis mais pesados"[4].

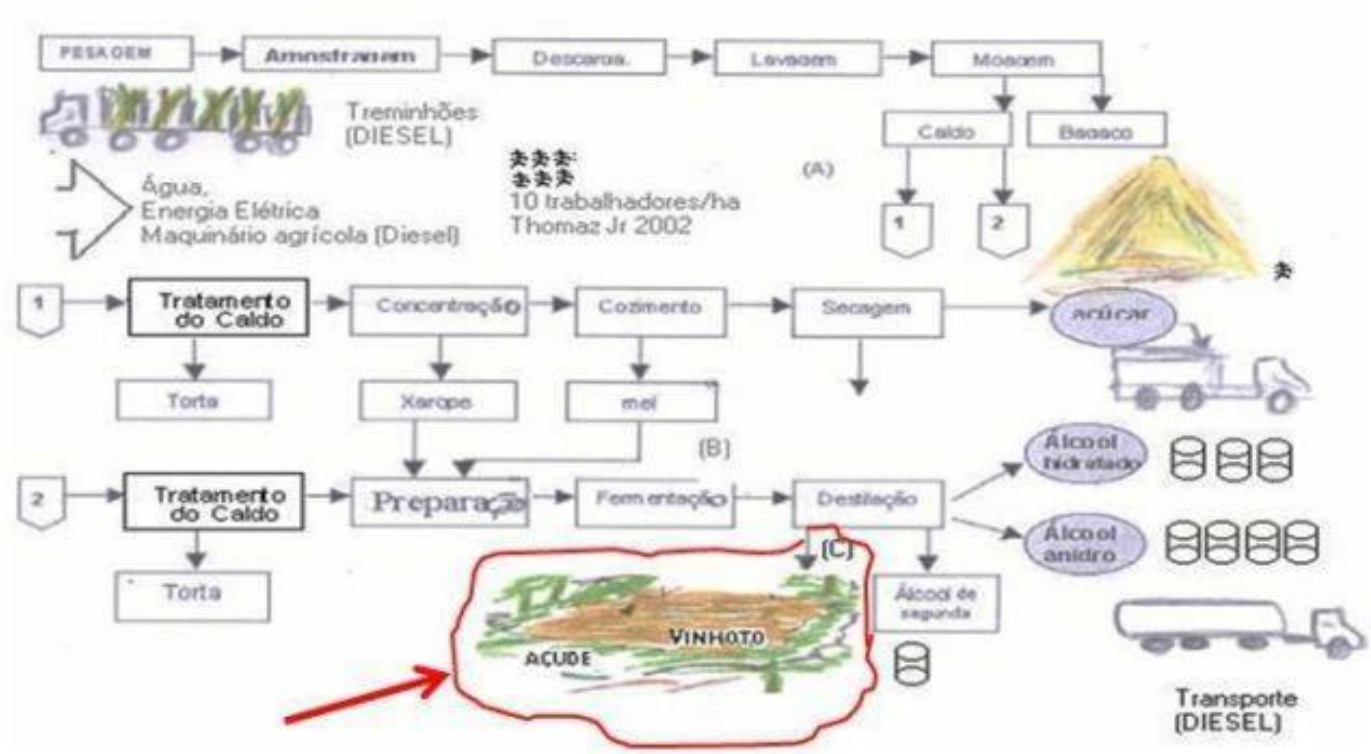
A quantidade de vinhaça produzida é significativa e varia na faixa de 10-15 litros de vinhaça por litro de etanol dependendo da configuração de equipamentos da destilaria. A composição da vinhaça varia de acordo como o mosto é composto, da mistura de caldo, mel e água [5]. De maneira geral a composição a seguir pode ser considerada como uma média para a vinhaça: 93% de água e 7% de sólidos, 75% dos quais correspondem à matéria orgânica. A fração sólida é constituída, principalmente, de compostos orgânicos e elementos minerais, dos quais cerca de 20% é K, o nutriente determinante para a definição da dose a ser aplicada nos solos [6]. Sendo assim uma opção natural de destinação da vinhaça é o seu uso como fertilizante. Contudo, esta opção não pode ser utilizada indiscriminadamente, pois o uso constante pode acarretar em acidificação ou saturação do solo, contaminação de lençol freático. Desta forma, sob o ponto de vista ambiental, a vinhaça se apresenta como um problema que precisa ser equacionado.

Dentre as novas opções para lidar com a quantidade de vinhaça produzida estão: A combustão, a produção de levedura, o uso na construção civil, a fabricação de ração animal, a digestão anaeróbia, incineração da vinhaça, entre outros, encontravam-se em desenvolvimento, cada uma delas em graus diferenciados de amadurecimento e de intensidade de pesquisa [6]. Dentre estas alternativas, o processo de biodigestão se apresenta como uma oportunidade energética de mais fácil implementação.

No processo de produção de açúcar ocorre a sulfitação do caldo que tem por objetivos principais inibir reações que causam formação de cor; a coagulação de coloides solúveis; a formação do precipitado $CaSO_3$ (sulfito de cálcio); e diminuir a viscosidade do caldo e, consequentemente, do xarope, massas cozidas e méis, facilitando as operações de evaporação e cozimento. Tal operação tem como consequencias a presença de enxofre na vinhaça, que por sua vez, durante o processo de digestão anaeróbica, produz gás sulfídrico (H_2S). O consumo médio de enxofre pode ser estimado em 150 g/saco de 50 kg de açúcar. [6]. O processo de produção de açúcar etanol é apresentado na Figura 2.

A presença deste gás no biogás produzido na digestão se constiui em um composto extremamente corrosivo para o sistema de produção de eletricidade e leva a necessidade de purificação do biogás.

Figura 2 – Esquemático da Produção de açúcar e etanol, situando a vinhaça no processoprodutivo – Adaptado de [4].



B. Unidade Experimental de Metanização da Vinhaça

A biodigestão ou fermentação anaeróbica é um método de reciclagem que consiste na produção de gás combustível e também de adubos (sólido e líquido), a partir de compostos orgânicos e é realizada por bactérias que existem livres na natureza [7]. Na Figura 3 é apresentado um esquemático da produção de biogás e na Figura 4 é apresentada uma modelagem do sistema indicando a complexidade do sistema.

No caso da vinhaça, o biogás produzido possui 70% de metano em sua composição, sendo completada por dióxido de carbono e aproximadamente 1-2% de gás sulfídrico (até 20.000 ppmV), tendo uma produtividade de 15-20 m³ de biogás/m³ de vinhaça [8].

Figura 3 – Esquemático do processo de Biodigestão [9].

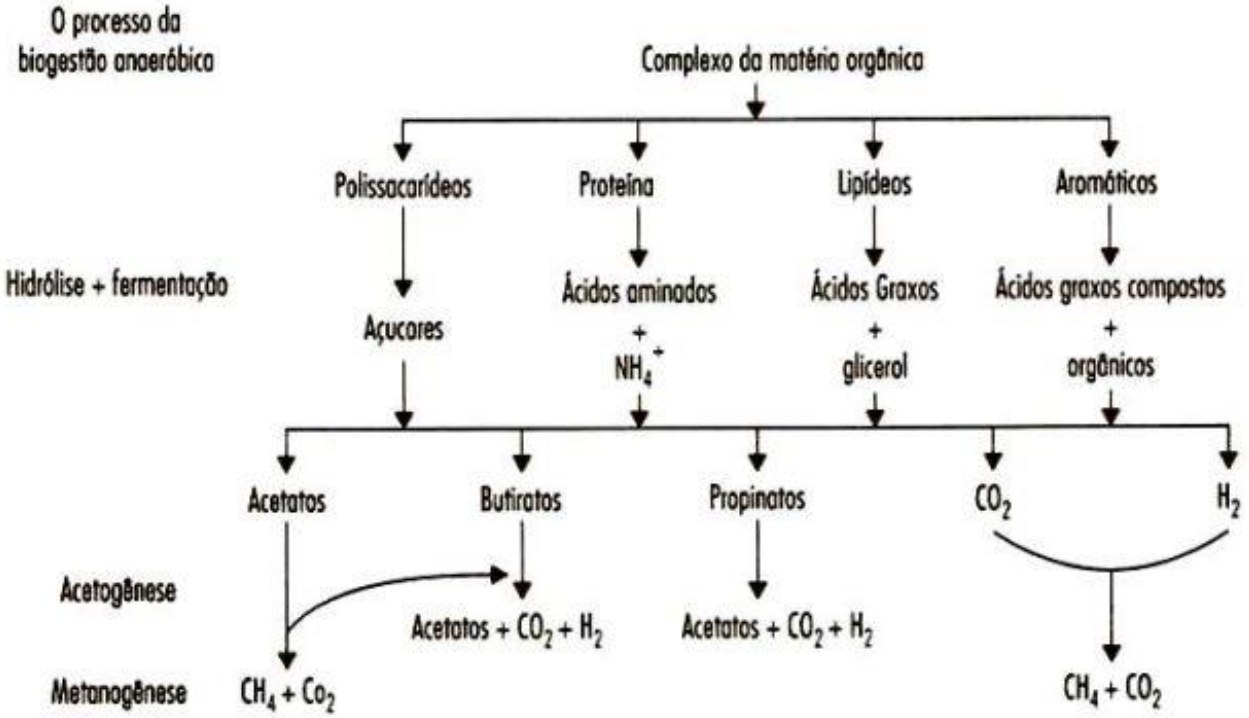
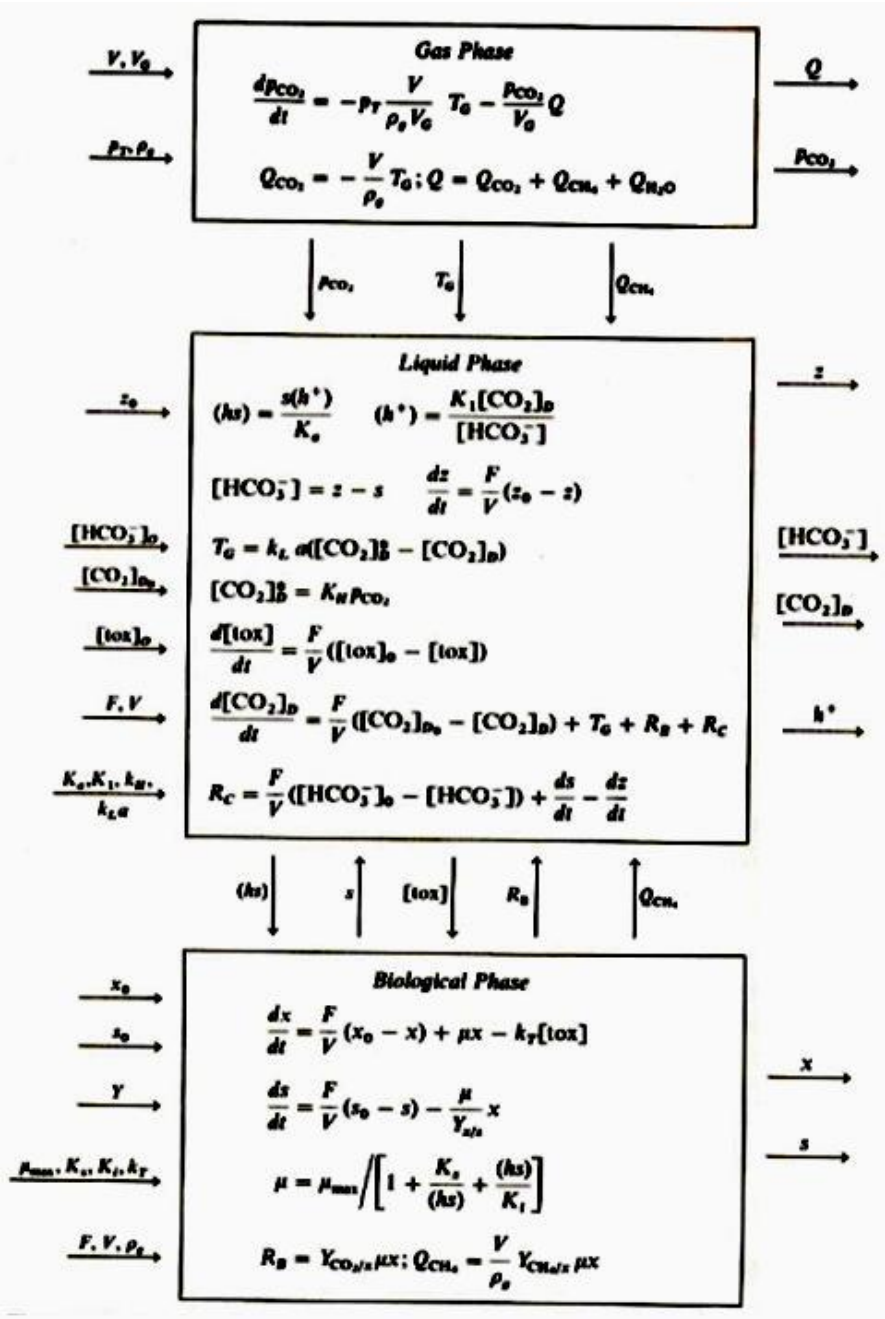


Figura 4 – Modelagem do processo de biodigestão. Adaptado de [10].



A variação da presença de enxofre no biogás ocorre devido à variação no processo de produção de açúcar e etanol, que é determinada por dinâmica de mercado. Isto acarreta em complexidade para o sistema de purificação, uma vez que ele precisa ser eficiente e se adaptar a estas variações.

A Planta Experimental de Metanização da vinhaça implantado na Usina de Monte Alegre (Adecoagro), em Monte Belo/ MG, e resultante de uma parceria entre: Cemig GT, Efficientia, Methanum e Adecoagro como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Unidade Piloto de Metanização em Monte Belo/MG.

Para o projeto piloto em questão avalia-se o potencial da Usina Monte Alegre de produção de 180 m³/dia de álcool, para uma geração aproximada de vinhaça igual a 2.340 m³/dia, produção média de biogás de 15.795 m³/h e produção de eletricidade de 1.184,62 kW [11]. Para tal foi projetado, construído e instalado um sistema piloto de capacidade de processamento de 10 m³ de vinhaça/hora e cuja operação ocorreu na safra de 2010/2011. Durante a operação desta unidade experimental foi verificado que o sistema convencional e simplificado de purificação de biogás consumia muito reagente, comprometendo a viabilidade econômica do projeto para a ampliação de escala.

O projeto de P&D Cemig/Aneel nº 453 tem como objetivo o desenvolvimento de uma tecnologia de purificação aplicada a biogás de vinhaça com foco na produção de energia elétrica.

Segundo a União da Indústria de Cana de Acúcar, na safra brasileira de 2008/2009 foram produzidos 27.506.096 m³ de etanol, gerando 357.579.248 m³ de vinhaça (13 m³/m³ etanol). Com base nos resultados da Unidade Piloto de Metanização da

vinhaça, o potencial de geração de biogás nesta safra seria de 5.363.688.720 m³. Considerando motores de cogeração com uma eficiência elétrica de 39% e um fator de capacidade de 95%, o potencial de geração de energia elétrica para a safra de 2008/2009, apenas para o setor sucro-energético, foi de 13.749 GWh/ano. Em Minas Gerais a aplicabilidade da tecnologia é igualmente promissora. O estado é o segundo maior produtor nacional de etanol, com uma produção estimada em 2.550.000 m³ para a safra 2010/2011, o que resultará cerca de 33.150.000 m³ de vinhaça, 497.250.000 m³ de biogás e um potencial de geração de energia elétrica de 1.275 GWh/ano.

Em suma, o desenvolvimento de sistemas para produção de energia a partir da biomassa vem de encontro não somente às expectativas de macro-setores econômicos como o sucro-alcooleiro, mas responde a objetivos do Governo Federal, de concessionárias e distribuidoras de energia elétrica, pautados na diversificação da matriz energética do país.

C. Metodologia

A metodologia essencial para este projeto foi o desenvolvimento experimental. O projeto foi dividido em seis principais etapas [12]:

1. Concepção da Engenharia da Unidade de Dessulfuração;

2. Construção da Unidade de Dessulfuração;

3. Start-up da Unidade de Dessulfuração;

4. Operação em contínuo da Unidade de Dessulfuração;

5. Estudos de Biotecnologia para clonagem e sequenciamento genético da microbiota;

6. Balanço de massa e energia da Unidade de Metanização e Dessulfuração, em conjunto.

A metodologia foi pensada de forma que ao final do projeto, além da solução do problema para a produção de energia na Usina Monte Alegre, a solução possa ser generalizada e aplicada em todo o país, em se tratando de biodigestão da vinhaça.

Devido à complexidade do projeto, o mesmo será dividido em três equipes principais, cada qual com suas respectivas atividades em cada uma das etapas apresentadas:

- Equipe de Engenharia: etapas descritas;
- Equipe de Biotecnologia: otimização do reator biológico de oxidação de sulfetos; avaliação da diversidade da comunidade microbiana presente no reator biológico, através da extração do DNA total, amplificação do DNAr 16S (com primers de bactéria), e posterior clonagem e sequenciamento; caracterização e quantificação das bactérias oxidadoras de sulfeto, usando de microscopia comum e de fluorescência, bem como através de técnicas moleculares; amplifi-

cação do DNA pela PCR utilizará primers específicos para as sulfobactérias verdes e púrpuras; contagem do número total de células e quantificação das sulfobactérias incolores será realizada pela técnica de hibridação *in situ* (FISH); inoculação do sistema de dessulfuração com microrganismos selecionados;

- Equipe Operacional: execução das atividades de operação.

D. Estado da Arte: Sistemas de Purificação de Biogás

Na tabela 01 é apresentado um resumo sobre processos de purificação de biogás.

Tabela 1 – Sistemas de Purificação Típicos [13].

Tipo	*Gás - Ácido*		*Tamanho da Planta*	*Pressão Parcial*	*Cap.S*
	H_2S	CO_2			
Absorção em solução	Sim	Sim	Grande	Baixa	Alta
Absorção física	Sim	Sim	Grande	Alta	Alta
Absorção oxidativa	Sim	-	Grande	Baixa	Baixa
Reação/Sorção seca	Sim	-	Pequeno	Baixa	Baixa
Membrana	Sim	Sim	Pequeno	Alta	Baixa
Adsorção	Sim	Sim	Pequeno	Baixa	Baixa
Metanação	-	Sim	Pequeno	Baixa	-

Legenda:
H_2S: Sulfeto de Enxofre
CO_2: Dióxido de Carbono
*Cap.S.:*Capacidade de processamento de enxofre

A seguir será apresentado de forma simplificada e bastante resumida, os principais sistemas de purificação e gás e biogás, de forma a levantar o estado da arte da tecnologia e subsidiar as o projeto conceitual e as definições necessárias ao P&D 453.

- Purificação Biológica [14]:

Várias bactérias anaeróbias produzem o H_2S, podendo se originar a partir do sulfato existente normalmente nas águas ou na decomposição de proteínas sulfurosas. Neste caso, é insuflado ar na parte superior do reator de biodigestão e também inserido uma rede de malha fina. A neutralização da acidez ocorre pela adição de NaCl ao reator. A adição de oxigênio também favorece o desenvolvimento de Bactérias que consomem H_2S transformando em enxofre elementar. Na Figura 6 é apresentado um sistema usando este tipo de purificação, onde pode ser visto o enxofre resultante. Trata-se do processo mais barato, mas o grande problema é a acidificação e consequente paralisação da biodigestão, quando se trata grandes quantidades de biogás.

Figura 6 – Purificação biológica de biogás.

- Sistema PSA (Pressure Swing Adsorption)

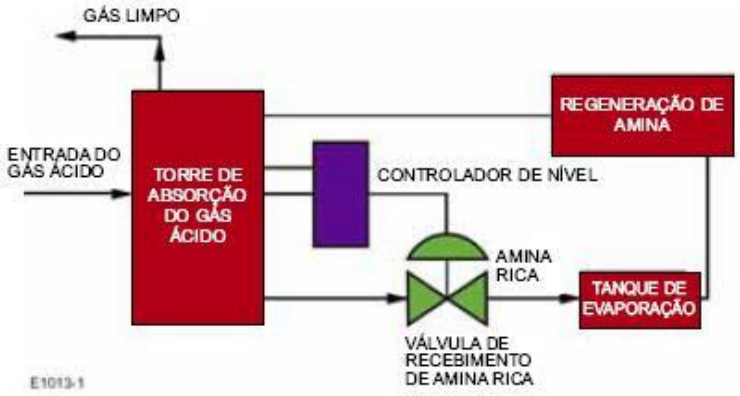
Este processo faz uso de um leito com carvão ativado onde ocorre um processo de adsorção. Este processo trata da adesão de moléculas de um fluido (o adsorvido) a uma superfície sólida (o adsorvente); o grau de adsorção depende da temperatura, da pressão e da área da superfície - os sólidos porosos como o carvão ativado são óptimos adsorventes. Na Figura 7 é apresentado o esquema de funcionamento do processo. Este sistema é bem simples e eficiente, mas por outro lado exige um insumo caro e que necessita de condições de processo que impactam no balanço energético.

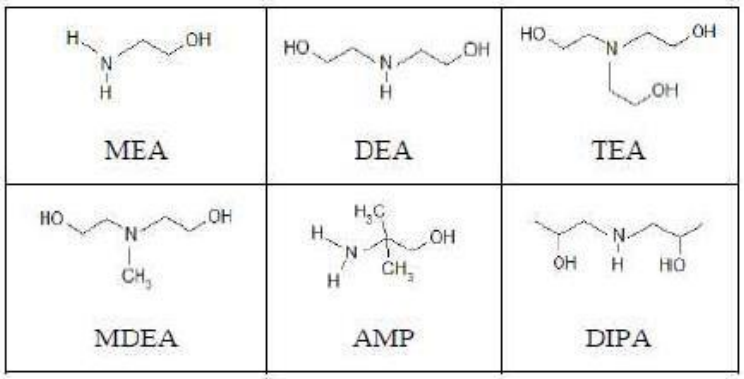
Figura 7 – Purificação por sistema de adsorção [15].

- Torre da absorção [13]:

Absorção na química é um fenômeno ou processo físico ou químico em que átomos, moléculas ou íons introduzem-se em alguma outra fase, normalmente mais massiva, e fixam-se. Este tipo de processo de purificação é bastante comum em refinarias de petróleo. Na Figura 8 pode-se verificar o esquemático do processo e algumas informações adicionais.

Figura 8 – Purificação por sistema de absorção [16]-[17].





Principais aminas de uso comercial.

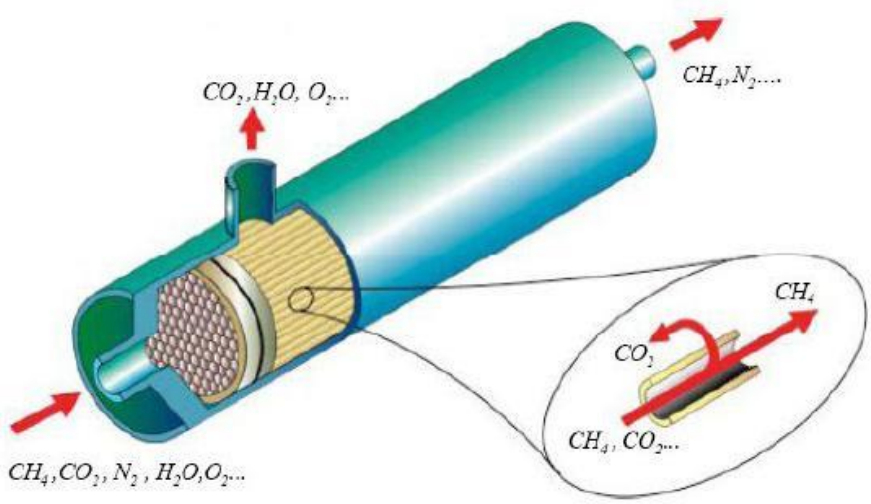
$$R_2NH + CO_2 \overset{K1,k21}{\leftrightarrows} R_2NH_2^+ HCO_3^- + H^+$$

$$R_2NH + H_2S \overset{K2}{\leftrightarrows} R_2NH_2^+ + HS^-$$

- Purificação utilizando membranas:

A osmose reversa é um processo de separação em que um solvente é separado de um soluto de baixa massa molecular por uma membrana permeável ao solvente e impermeável ao soluto. Isso ocorre quando se aplica uma grande pressão sobre este meio aquoso, o que contraria o fluxo natural da osmose [18]. Por essa razão o processo é denominado osmose reversa. Este processo é muito eficiente e não exige manutneção. Mas por outro lado é bastante complexo e de elevado custo de implantação. A figura apresenta uma ilustração da sua operação. A Figura 9 apresenta uma ilustração do mecanismo pelo qual o processo de separação por membranas que faz uso do principio da osmose reversa funciona.

Figura 9 – Purificação por membranas [19].



E. Projeto do Sistema de Purificação do Projeto 453

A Unidade de Dessulfuração é subdividida em dois sub-sistemas:

- Sistema químico para remoção do H_2S;
- Sistema biológico para oxidação de sulfetos.

Para o dimensionamento do sistema, foram considerados os parâmetros da tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros para dimensionamento do sistema de dessulfuração.

Parâmetro	Unid.	Valor	
		Mín.	Máx.
Temperatura do biogás	°C	25	
Altitude	m	812	
Pressão atmosférica	atm	0,9065	
Pressão manométrica da linha de biogás	atm	0,05	
Pressão absoluta	atm	0,96	
Fração volumétrica de oxigênio (O_2) na atmosfera	%	20,95	
Vazão do biogás	m^3/ dia	20,00	
Densidade do H_2S	kg/m³	1,3313	
Densidade do metano (CH_4)	kg/m³	0,6268	
Densidade do dióxido de carbono (CO_2)	kg/m³	1,7194	
Fração volumétrica de CH_4	%	70,00	
Fração volumétrica de CO_2	%	28,00	29,25
Fração volumétrica de H_2S	%	0,75	2,00
Densidade do Biogás nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP)	kg/m³ de biogás	1,0812	1,0867

F. Sistema químico para remoção do sulfeto de hidrogênio

O processo químico se inicia em uma Torre de absorção do tipo lavador Venturi (T-01), que promove o contato gás/ líquido e a solubilização do H_2S em uma solução de lavagem constituída de hidróxido de sódio (NaOH) e/ ou quelato férrico ($Fe^{3+}EDTA^{4-}$). Posteriormente uma Torre de desabsorção do tipo borbulhamento (T-04) realiza a recuperação/ reativação do solvente.

Como demonstrado em (1), há formação do íon hidroxila (OH^-), obtido através da solução aquosa de NaOH. Nesta etapa, o H_2S, ao entrar em contato com o OH^-, transfere o enxofre para a fase líquida, formando o íon sulfeto de hidrogênio (HS^-) como exemplificado em (2), ou então é convertido a S_0, quando entra em contato com o $Fe^{3+}EDTA^{4-}$, como apresentado em (3).

$$NaOH + H_2O \rightarrow Na^+ + OH^- + H_2O \quad (1)$$

$$H_2S + OH^- \rightarrow HS^- + H_2O \quad (2)$$

$$H_2S_{(aq)} + 2Fe^{3+}EDTA^{4-} \rightarrow S^0 + 2H^+ + 2Fe^{2+}EDTA^{4-} \quad (3)$$

Após a retirada de H_2S do biogás é realizada a recuperação do S_0 em um decantador primário. A solução é direcionada à torre de borbulhamento onde é oxidada pelo O_2 introduzido no sistema. Como apresentado em (4), a parcela de enxofre ionizada na solução é oxidada a S_0 e, como verificado em (5), ocorre a recuperação do $Fe^{3+}EDTA^{4-}$ e OH^-.

$$HS^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow \frac{1}{8}S_8^0 + OH^- \quad (4)$$

$$4Fe^{2+}EDTA^{4-} + O_{2(aq)} + 2H_2O \rightarrow 4Fe^{3+}EDTA^{4-} + 4OH^- \quad (5)$$

G. Sistema biológico para oxidação de sulfetos

O sistema biológico para oxidação de sulfetos, ou torre biológica (T-02), é constituído por um biofiltro com meio suporte, possui um sistema de recirculação de líquidos e a operação ocorre em contracorrente, visando promover o contato contínuo do biogás com as bactérias aderidas ao meio. As bactérias empregadas no sistema utilizam o H_2S como fonte de energia química. As reações ocorridas são demonstradas em (6), (7) e (8).

$$H_2S + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow S^0 + H_2O \quad (6)$$

$$S^0 + H_2O + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (7)$$

$$H_2S + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (8)$$

H. Benefícios do Projeto

O principal benefício deste projeto é apresentar uma solução para o problema de purificação de biogás contaminados com enxofre e que se constitui em uma possibilidade de se viabilizar novos negócios em energia e também em eficiência energética no setor sucroalcooleiro. Além disso, a formação de recursos humanos, o fomento a indústria e a fabricantes de equipamentos e o desenvolvimento de opções energéticas também podem ser citados como benefícios esperados com o sucesso deste projeto.

26.3 Resultados

Considerando-se as equações estequiométricas e estimativas de remoção de H_2S de 97,3 a 99,0%, serão removidos até 527,18 g/dia de H_2S em concentrações máximas de 0,266 g de H_2S / m³ de biogás, para cada sistema químico, conforme apresentado no balanço de massa das figuras a seguir. A operação na Figura 10 é realizada com NaOH, enquanto na 11 é utilizado o $Fe^{3+}EDTA^{4-}$. [20].

A Figura 12 mostra o balanço de massa para o sistema biológico. As Figuras 13-14 mostram o projeto conceitual do sistema em construção – Testes previstos – Maio/2013.

Figura 10 – Balanço de Massa do Sistema Químico Operando com Hidróxido de Sódio.

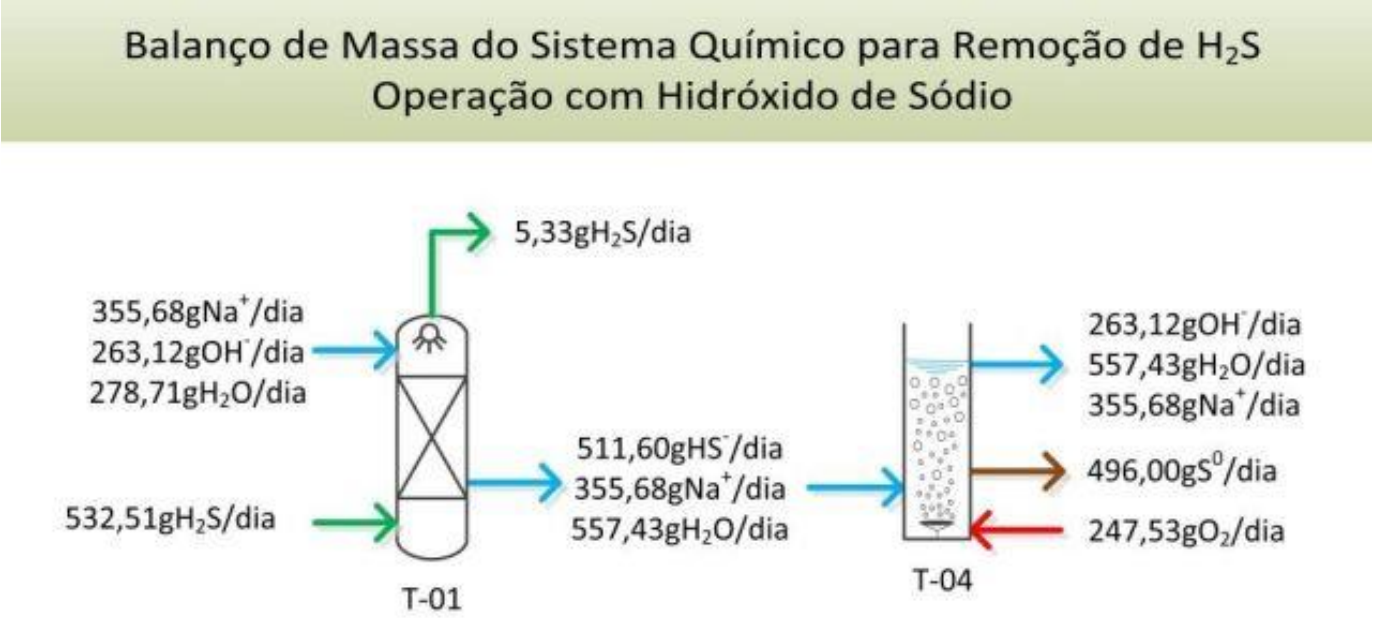


Figura 11 – Balanço de Massa do Sistema Químico Operando com Quelato Férrico.

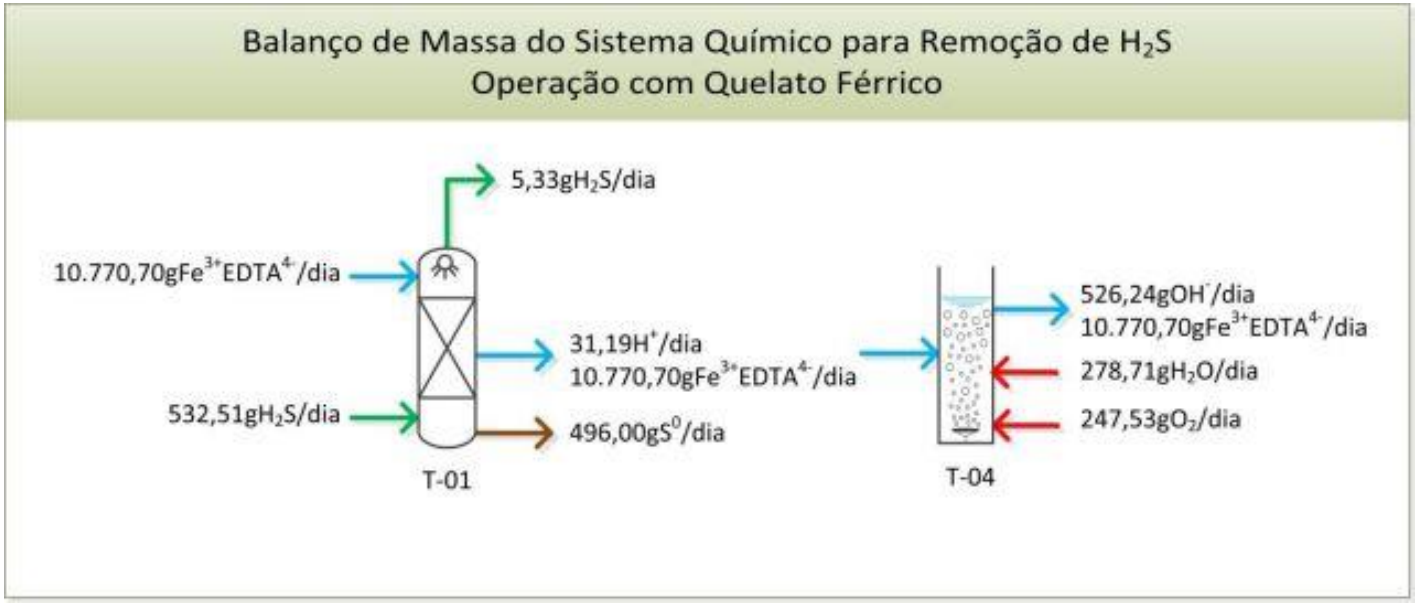


Figura 12 – Balanço de Massa do Sistema Biológico.

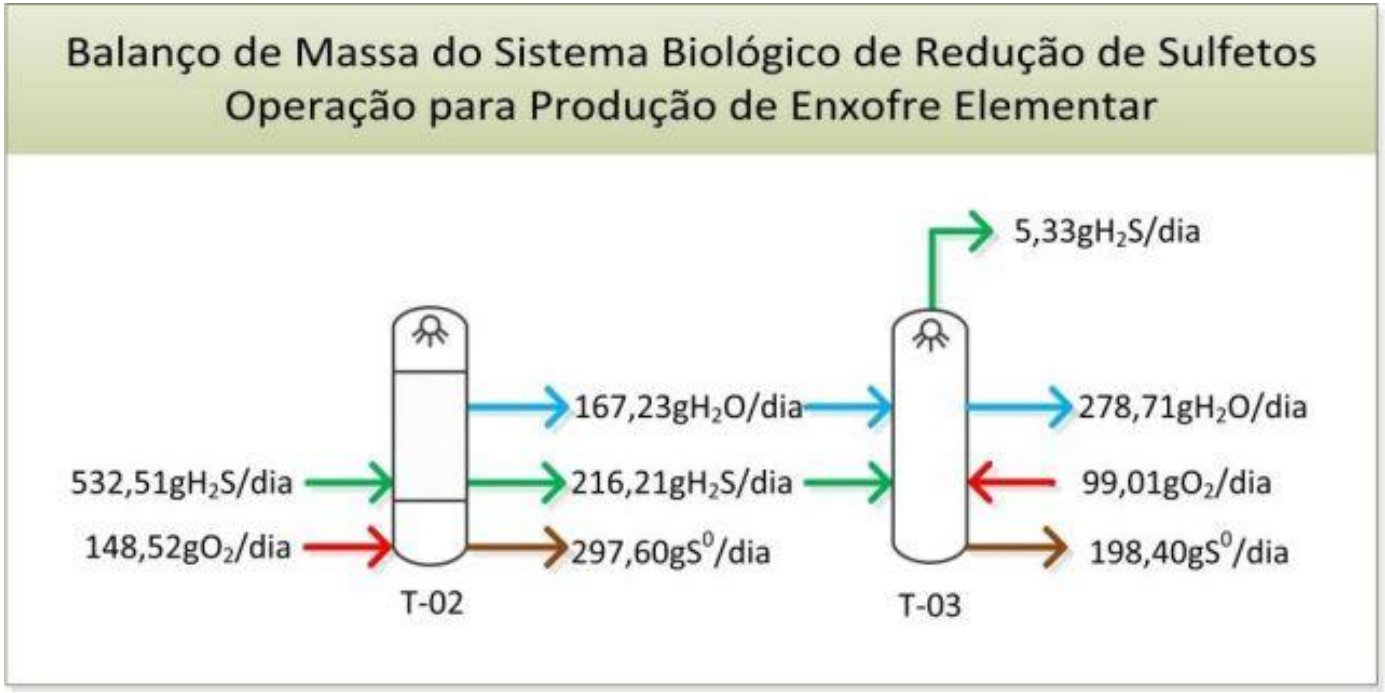


Figura 13 – Fluxograma do sistema biológico de remoção de sulfetos.

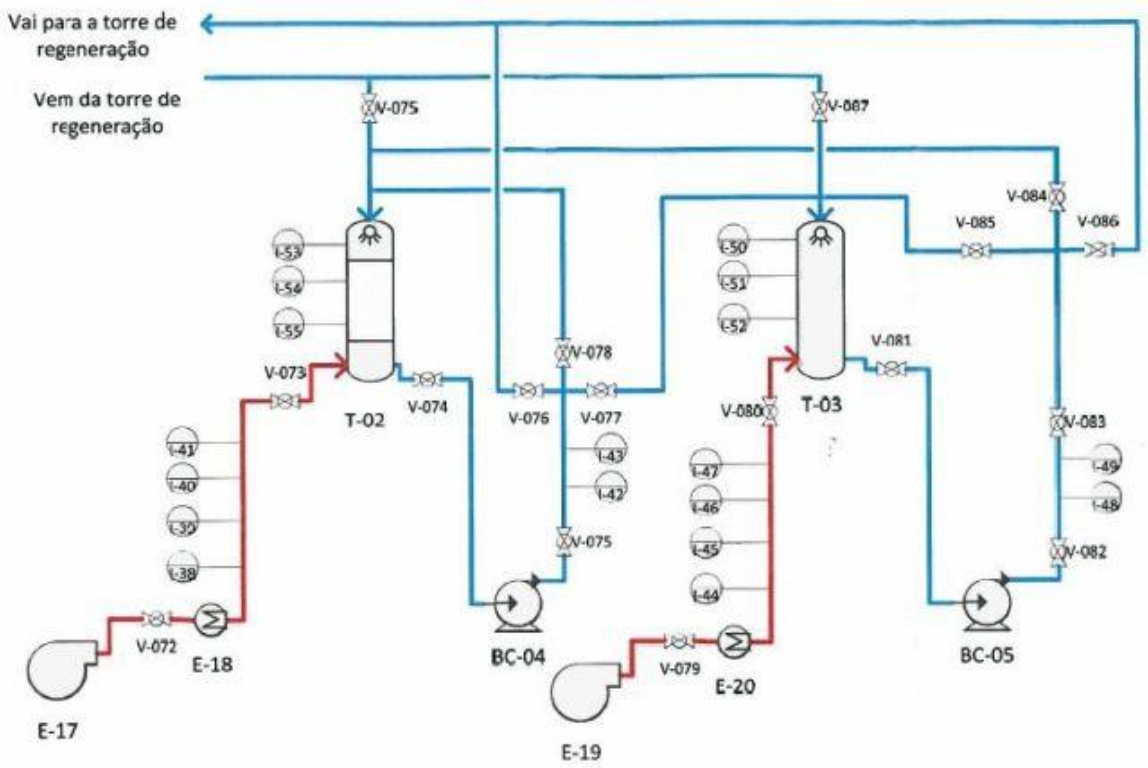
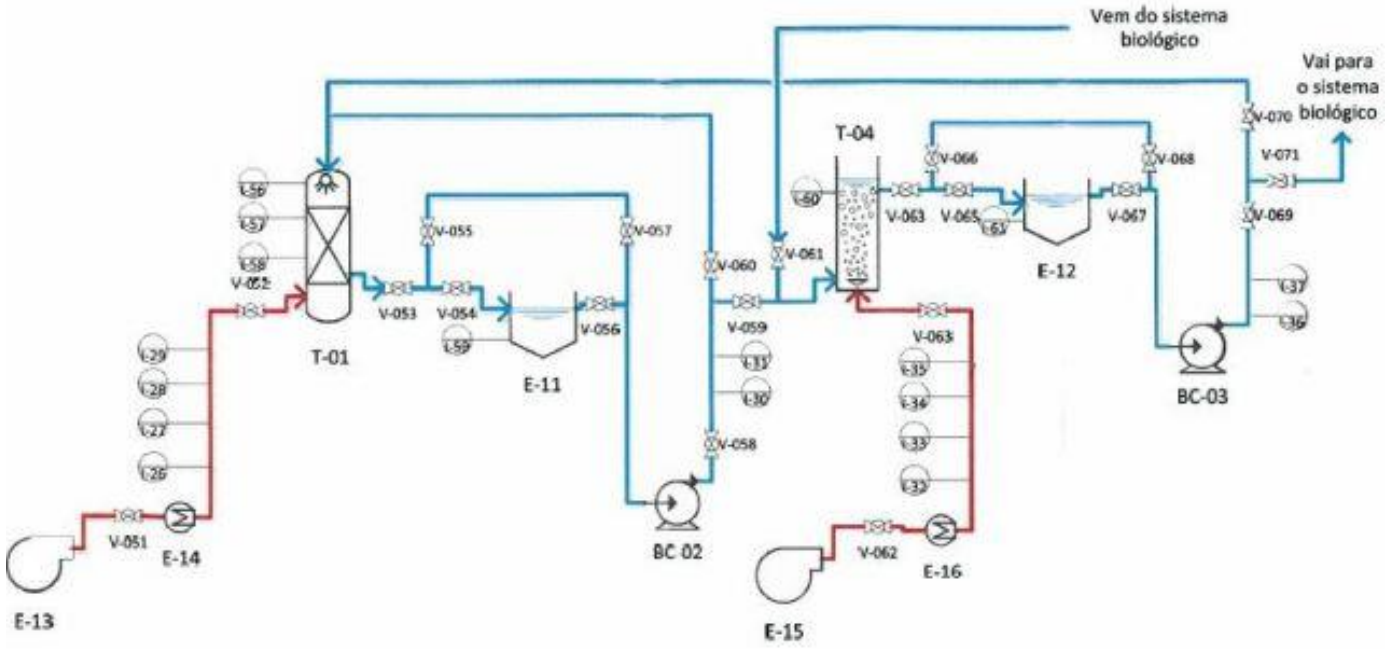


Figura 14 – Fluxograma do sistema químico de remoção de sulfetos.



26.4 Conclusões

O desenvolvimento de tecnologia de purificação do biogás para a geração de energia elétrica a partir da vinhaça assume elevada importância no contexto nacional à medida que responde a interesses das concessionárias, distribuidoras de energia elétrica e do setor sucroenergético.

Foi levantado o estado da arte da tecnologia, o que forneceu elementos para o desenvolvimento conceitual e modelagem do projeto. No momento, o projeto encontra-se em sua fase construtiva, sendo que para o ano de 2013 serão realizados os testes e o encerramento do projeto.

Os resultados até o momento indicam que o projeto se mantem promissor em viabilizar uma solução de purificação de biogás que promova a produção de eletricidade de vinhaça.

A tecnologia proposta possibilitará ao setor a ampliação do equivalente a 30% a geração de energia atual a partir do bagaço da cana, que hoje responde por 90% de toda a energia gerada a partir da biomassa no Brasil. [21].

Capítulo 27

Capítulo 27: Geração Termelétrica Descentralizada para o Setor Siderúrgico[27]

***Resumo*- O cenário energético atual busca, cada vez mais, aproveitamento energético de resíduos industriais e eficiência de processos. Neste contexto, o setor siderúrgico desponta com grande potencial para produção de cogeração e ações de eficiência de processos. Desta forma, surge este projeto de pesquisa, que basicamente buscou mapear este potencial de cogeração no setor siderúrgico no estado de Minas Gerais. O trabalho resultou em um mapeamento georreferenciado e em um *software*, que pode orientar e suportar decisões de investimento e de novos negócios em energia e de eficiência energética.**

27.1 Introdução

A matriz energética brasileira sofrerá mudanças profundas nos próximos anos com a redução significativa da participação da geração elétrica de origem hidráulica frente à geração térmica [1]. Estudos elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética [2], apontam para a necessidade de aumento em nosso parque gerador de 5000 MW a cada ano para atendimento ao nível de crescimento previsto para o Brasil.

Assim sendo, uma das alternativas viáveis para garantia de suprimento de energia no setor industrial brasileiro é a geração termelétrica principalmente a partir do uso de gases residuais do próprio processo.

Entretanto, de modo quase paradoxal, constata-se uma crescente preocupação nacional e internacional com os impactos ambientais da produção e uso da energia nas suas formas convencionais. O aumento de emissões de gases de efeito estufa ou prejudiciais à camada de ozônio, já foram explicitadas na participação brasileira no Protocolo de Kyoto e em encontros subsequentes. No setor siderúrgico, nota-se um grande potencial para implantação de usinas termelétricas que utilizem o gás de alto forno residual do setor produtivo como combustível para geração de energia elétrica, bem como também o aproveitamento de alcatrão de madeira e finos de carvão, subprodutos de processos ligados às empresas siderúrgicas, que possuem plantações próprias de madeira para produção de carvão vegetal.

A viabilidade da implantação de usinas termelétricas para o setor siderúrgico é fortemente baseada na disponibilidade de um combustível abundante e de baixo custo, como é o caso destes subprodutos. Nota-se, em geral, esta disponibilidade de gases de alto forno em empresas siderúrgicas de considerável porte de produção de ferro-gusa.

---

[27] PEREIRA, E. M. D. ; MACIEL, C. R. F. ; SILVA, C. H. F. ; PORTO, M. A. D.. Publicado em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

Diante deste cenário, a busca pela eficiência energética em todos os processos e setores consumidores de energia assumirá importante papel em nossa matriz, na forma de "usina virtual", ou seja, a economia e conservação de energia advinda do estabelecimento de programas e projetos de combate ao desperdício de energia poderão ser avaliadas como uma forma virtual de geração de energia.

Deve-se ressaltar, ainda, que medidas de economia e conservação de energia possibilitam a postergação de investimentos em diferentes níveis de atuação, maior competitividade industrial e mercadológica para os diversos setores da sociedade, assim como a redução dos impactos ambientais intrínsecos à geração de energia centralizada, em praticamente todas as suas formas.

Desta forma foi desenvolvido o presente projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) no âmbito do Programa Cemig/Aneel nº 185 - Geração termelétrica descentralizada para o setor siderúrgico – Código Aneel PD-4591-0185/2006. Este projeto teve como objetivos mapear oportunidade de negócios e eficiência energética no setor siderúrgico. O seu principal resultado foi um mapeamento georreferenciado e um *software* onde se encontra indicados os potenciais com algumas possibilidades de análise. A grande importância deste estudo, além do melhor conhecimento do setor siderúrgico é subsidiar a concessionária de energia para oportunidades de negócios. Ao mesmo tempo, os agentes públicos também podem fazer uso destas informações para a tomada de decisões e formatação de políticas públicas e incentivos.

A metodologia utilizada para a realização deste projeto foi a pesquisa exploratória, baseada no estado da arte da tecnologia e no levantamento bibliográfico, juntamente com coleta de dados e informações em campo e realizando-se estudos de casos, pela programação e simulação, de forma a produzir um mapeamento georreferenciado com o potencial do setor siderúrgico.

Este projeto foi executado em parceria com a PUC-Minas e encontra-se encerrado.

27.2 P&D GT Nº 185

O principal objetivo do projeto é criar uma ferramenta de avaliação energética, com base nas leis da termodinâmica, para apoio a decisão em projetos visando o atendimento de demanda advinda dos setores de geração e uso eficiente de energia no setor industrial [1]. Como consequência haverá a formação e qualificação de recursos humanos necessários à implantação e gerência de programas de eficiência energética.

O projeto tem como produtos finais:

- Base de dados georeferenciada das indústrias siderúrgicas e das respectivas fontes de combustíveis disponíveis para Minas Gerais;
- Mapeamento do potencial de aproveitamento de resíduos energéticos das diversas indústrias siderúrgicas de Minas Gerais;

- Programa computacional de análise energética e exergética de equipamentos e instalações da indústria siderúrgica - SPT;
- Estudos de eficiência energética voltada para equipamentos e instalações da indústria siderúrgica;
- Relatórios anuais de atividades dentro do tema;
- Uma dissertação de Mestrado e relatório das bolsas de iniciação científica.

A relevância deste trabalho para o Setor Energético, reside na geração de dados e procedimentos metodológicos que facilitem a tomada de decisão para implantação de unidades de cogeração ou termelétricas, e otimização da utilização da energia, cuja aplicação poderá se estender futuramente a outros tipos de indústrias, com repercussão positiva, tanto social, quanto econômica, para todo o país.

A. Metodologia

O projeto foi concebido para ter o seu desenvolvimento utilizando de três macroatividades principais [1]:

- Levantamento do Cenário Energético do Setor Siderúrgico;
- Desenvolvimento de um programa computacional SPTS em ambiente EES (Engineering Equation Solver);
- Confecção do Atlas Georreferenciado para o Setor Siderúrgico de Minas Gerais.

Para o levantamento de dados sobre o setor siderúrgico foram realizadas as seguintes atividades:

- Fundamentação teórica e qualificação da equipe em programas de Doutorado, Mestrado e Iniciação Científica e bolsista de pós-doutorado;
- Revisão da bibliografia nacional e internacional nos temas pertinentes ao projeto, seguido da criação de seminários internos para apresentação dos diferentes tópicos pelos profissionais envolvidos. Realização de uma extensiva pesquisa bibliográfica em: Balanço Energético Estadual (2007) e Balanço Energético Nacional (2008), Anuário Estatístico do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2007). Relatórios do Sindifer (2008), Anuário do Departamento Nacional de Produção Mineral (2008), Associação Mineira de Silvicultura (2008) [3]-[7]. Tais seminários têm o objetivo de uniformizar a linguagem, nomenclatura e o próprio conhecimento adquirido;
- Análise prospectiva sobre cenário energético mineiro para identificação de áreas de interesse da Concessionária de Energia, processos industriais no setor siderúrgico e gases residuais e combustíveis típicos.

Para a elaboração do programa computacional foram feitas as seguintes ações:

- Capacitação e treinamento da equipe no *software Engineering Equations Solver* - EES, adotado internacionalmente na área de atuação do projeto;
- Desenvolvimento dos algoritmos e implantação das rotinas computacionais;
- Realizadas simulações para definição de parâmetros otimizados e análise de sensibilidade das propriedades termodinâmicas e parâmetros de projeto, visando a eficiência energética do setor;
- Pesquisa em campo sobre a disponibilidade de energia no setor siderúrgico com saída de dados georreferenciados;
- Validação dos programas desenvolvidos a partir do acervo disponível na CEMIG e/ou medidas diretas em indústrias selecionadas. Para validação do programa serão realizadas comparações entre os resultados simulados e experimentais a serem fornecidos pelo próprio setor siderúrgico.

Finalizando o projeto, os resultados foram consolidados e formatados em um relatório final, que se constitui em um Atlas Georreferenciado para o Setor Siderúrgico de Minas Gerais. Este estudo foi apresentado em diversos seminários dedicados ao tema, inclusive para o setor siderúrgico mineiro, que reconheceu o seu potencial para fomentar e alavancar empreendimentos, com a ressalva da necessidade de permanente atualização, uma vez que se trata de um setor sujeito a constantes modificações pela economia global e de mercado.

O produto final deste projeto foi um *sotfware* com mapeamento georrefernciado de potencial de cogeração no setor siderúrgico. Os principais benefícios associados com o desenvolvimento deste projeto encontram-se no conhecimento aprofundado do setor siderúrgico, na formação de recursos humanos e na possibilidade de novos negócios em energia e em eficiência energética.

A originalidade deste projeto reside no fato de que não existe uma ferramenta que se proponha a mapear potencial de cogeração no setor siderúrgico. Trata-se de uma pesquisa básica que está preocupada em fornecer novas opções de negócios para a concessionária de energia e também com a formação de conhecimento e recursos humanos. Do ponto de vista da técnica, ou tecnologia, tais aproveitamentos energéticos já são amplamente realizáveis, mas os autores acreditam que mapear pode contribuir para a decisão de investimento, ou pela concessionária de energia ou pelo parceiro privado. Em qualquer uma das opções, a sociedade e o meio ambiente tem o seu benefício, e o investimento de pesquisa realizado encontra-se justificado.

27.3 Resultados [8]

Foi feito um panorama energético do setor siderúrgico, conforme apresentado na Figura 1, que serviu como base para se aprofundar os conhecimentos sobre o setor siderúrgico. Tais informações serão omitidas de serem descritas neste artigo, mas compõe a documentação do projeto. Na Figura 2 encontra-se a estrutura de con-

sumo energético do setor siderúrgico, que serve como base para as análises de eficiência de processo.

Em relação ao panorama geral do setor siderúrgico mineiro, foram identificadas 67 empresas de produtores independentes de ferro-gusa e que utilizam carvão vegetal como agente de transformação do minério de ferro. A localização geográfica predominante é a região Noroeste com 27 siderúrgicas não integradas, das quais 24 estão em Sete Lagoas. Nessa região, o número médio de altos-fornos instalados por empresa é da ordem de 1,75 com capacidade instalada de 330.300 toneladas por mês e produção estimada em 194.000 toneladas por mês, ou seja, 51% da produção de Minas Gerais, estando 20 altos-fornos paralisados na região, Figura 3. Na Figura 4 é apresentado o mapa georreferenciados das siderúrgicas e cujos dados compõe a base de dados para o desenvolvimento do *software* que realiza os cálculos de engenharia para se encontrar o potencial de produção de eletricidade e energia ou cogeração das siderúrgicas.

A modelagem desenvolvida trata de uma usina termelétrica que opera segundo o Ciclo Rankine e turbina a vapor de contrapressão, conforme esquematizado na Figura 5. As equações que compõem o modelo da usina termelétrica são clássicas e as referências utilizadas são de [9]-[10] e a estrutura de cálculo é indicada nas Figuras 6-8.

As pressões à entrada da turbina são: 21 bar, 42 bar e 63 bar, sendo as respectivas temperaturas de 300º C, 420º C e 510º C. A pressão no condensador pode assumir os valores de 0,05 bar; 0,1 bar e 1 bar. Tais condições foram selecionadas com base em catálogos de equipamentos comercialmente disponíveis.

Para o estado de Minas Gerais, o potencial de geração de eletricidade a partir de termelétricas a gás de alto forno em siderúrgicas não integradas, para cada uma das 67 empresas pesquisadas e totalizando mais de 200 simulações, encontram-se na faixa entre 58 MW e 127 MW, descontados os 30 MW já instalados (Figuras 9-10). Neste cálculo as premissas adotadas foram: reinjeção de 50% e operação em 100% da capacidade instalada.

Considerando a operação dessas 40 empresas durante 24 horas e 300 dias por ano, a produção de energia pelas usinas termoelétrica para os valores máximo e mínimo e para a média (referência Siderpa) é mostrada no gráfico da Figura 11. Em termos médios e, considerando o consumo anual do setor não integrado de 34 mil tep, pode-se observar que o valor mínimo de produção de energia atenderia à demanda anual do setor.

Figura 1 – Panorama do setor siderúrgico.

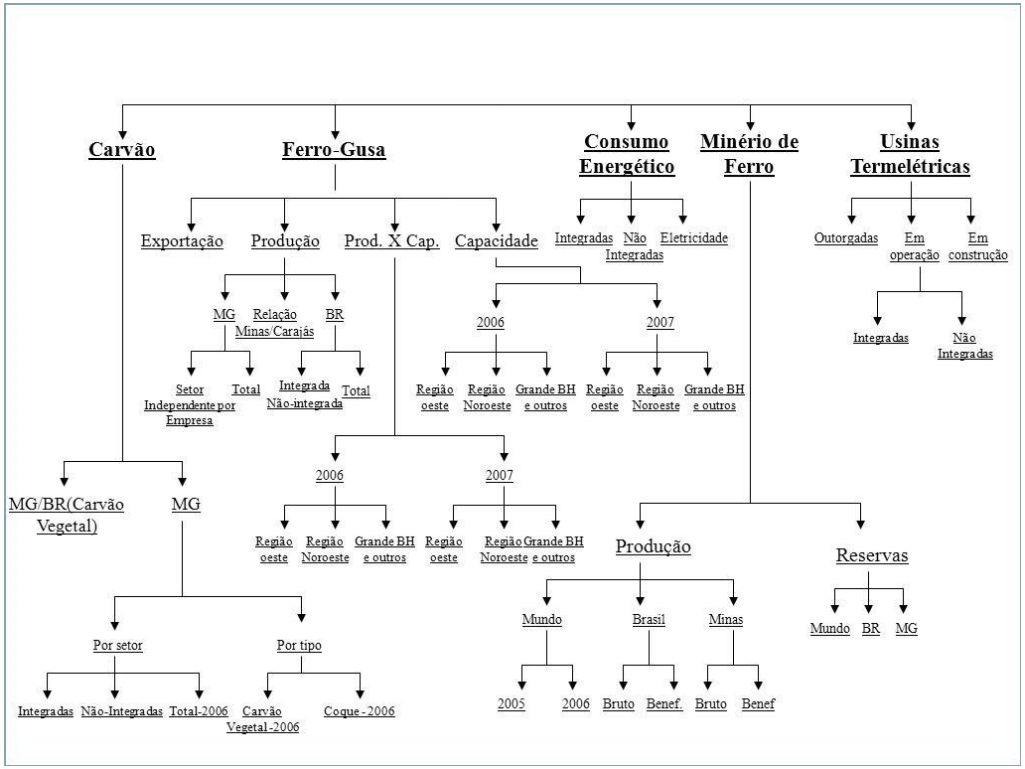


Figura 2 – Estrutura de consumo energético do setor siderúrgico integrado em Minas Gerais [3].

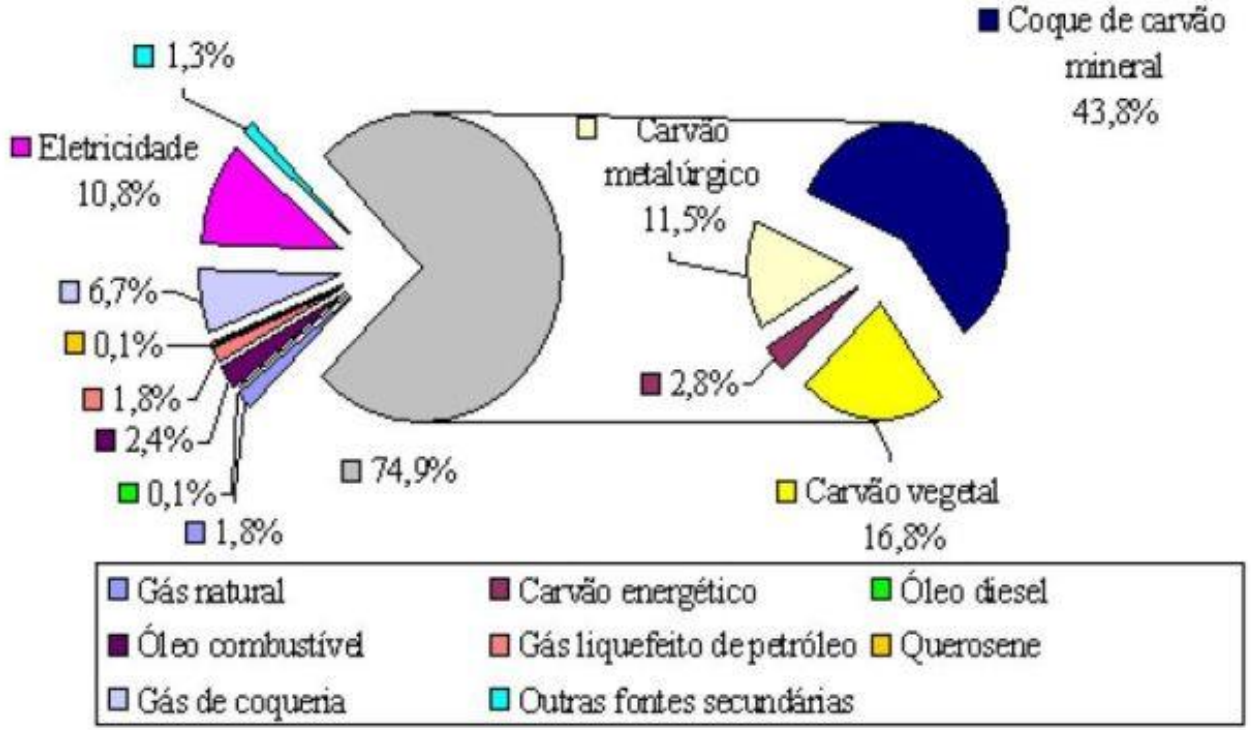


Figura 3 – Capacidade instalada e produção de ferro gusa em Minas Gerais – Ano Base 2007.

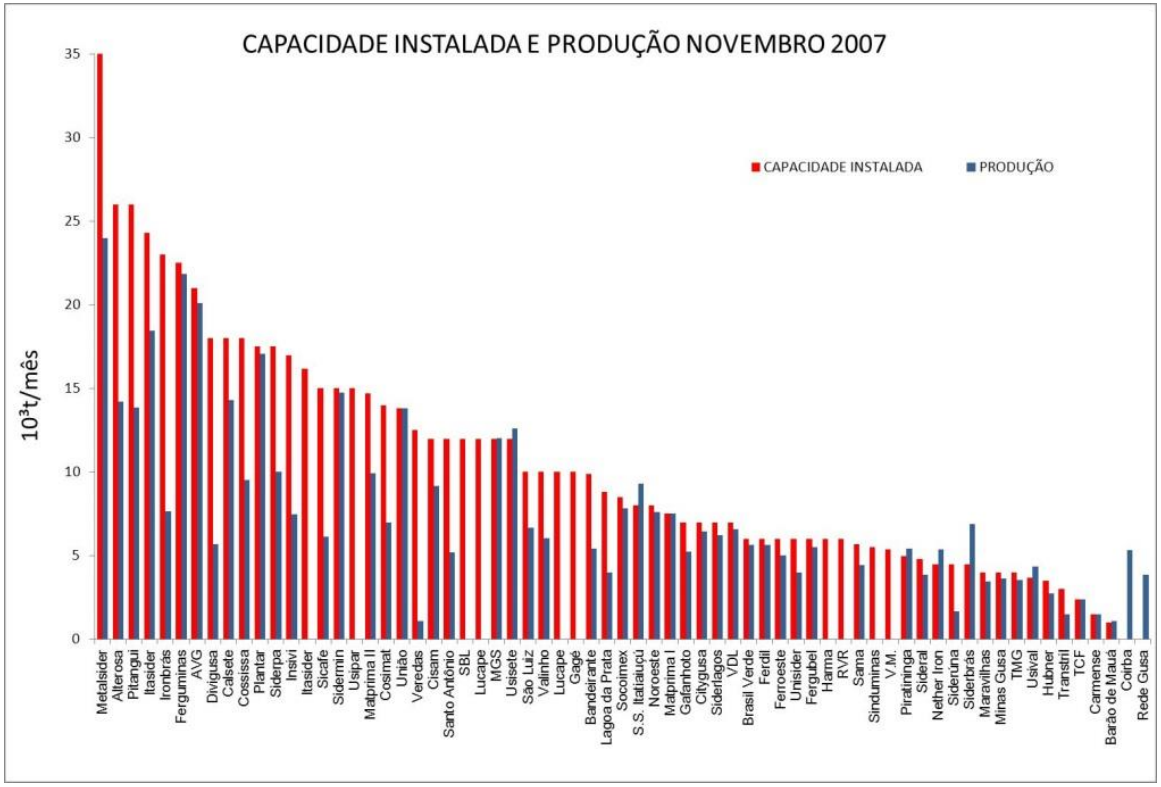


Figura 4 – Localização georreferenciada.

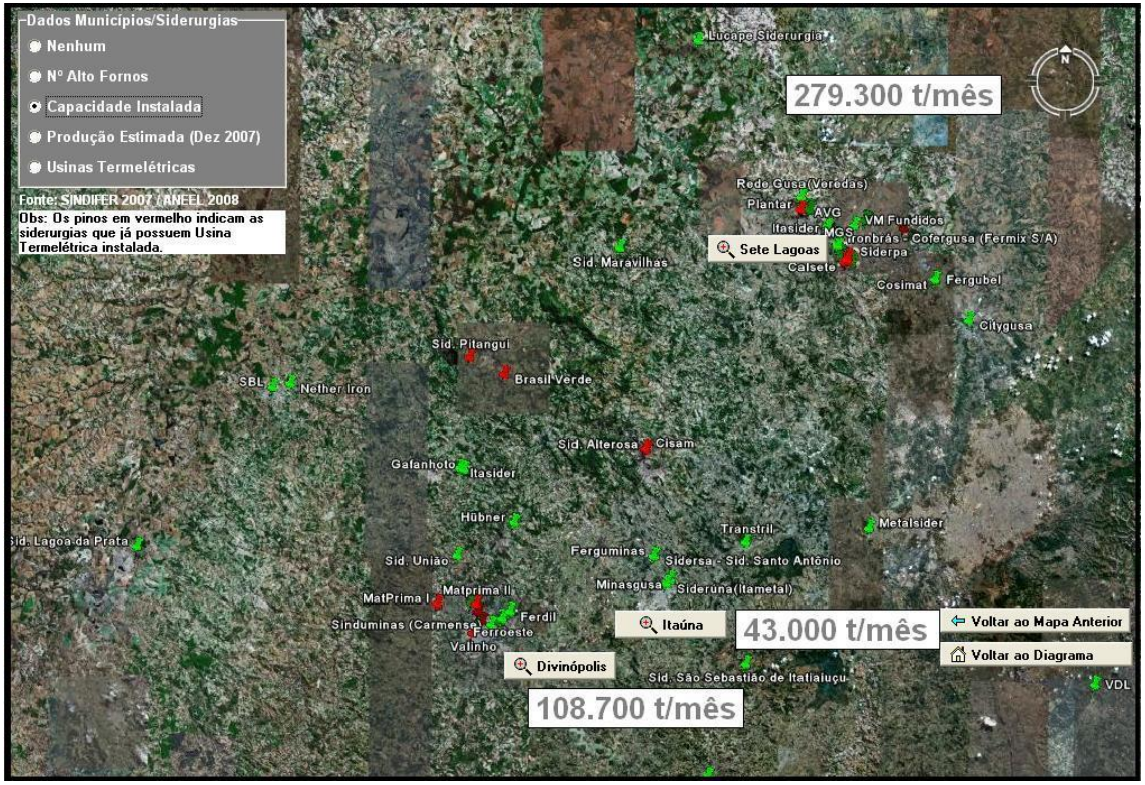


Figura 5 – Tela de saída de resultados do *software* SPT (Simulador de Potencial Termoelétrico).

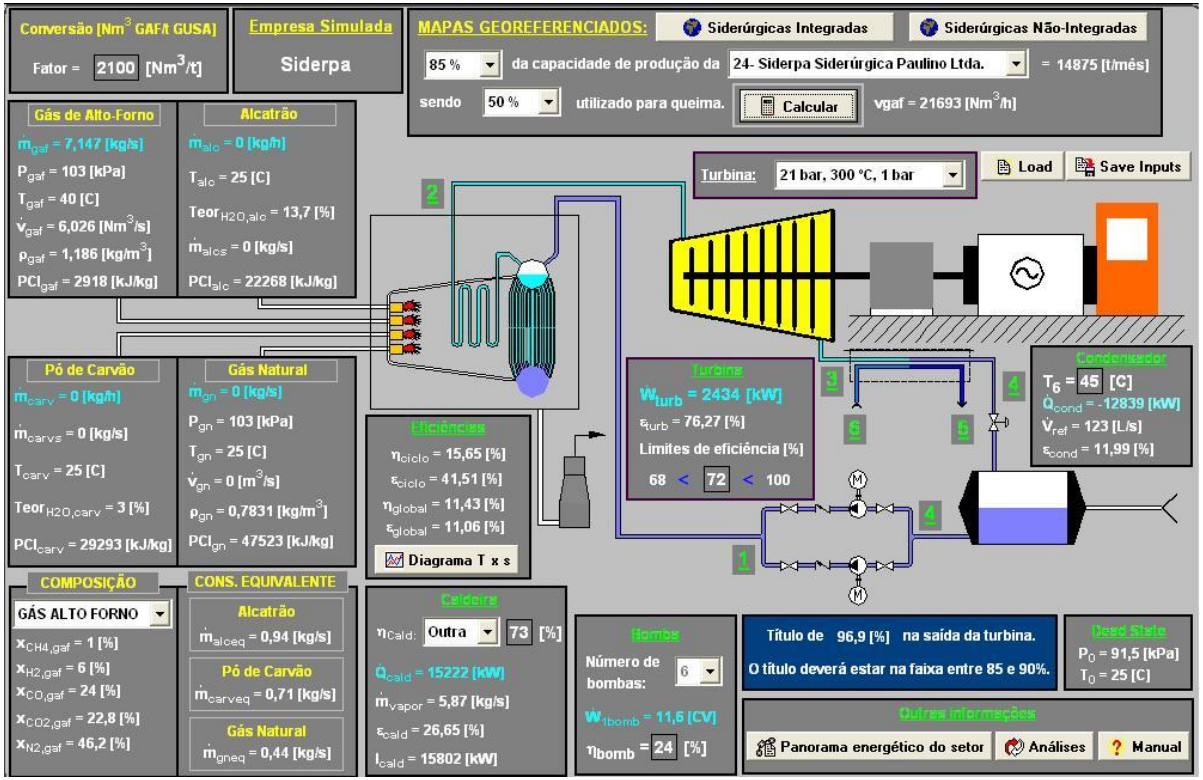


Figura 6 – Esquema de cálculos termodinâmicos para determinação de potencial de cogeração.

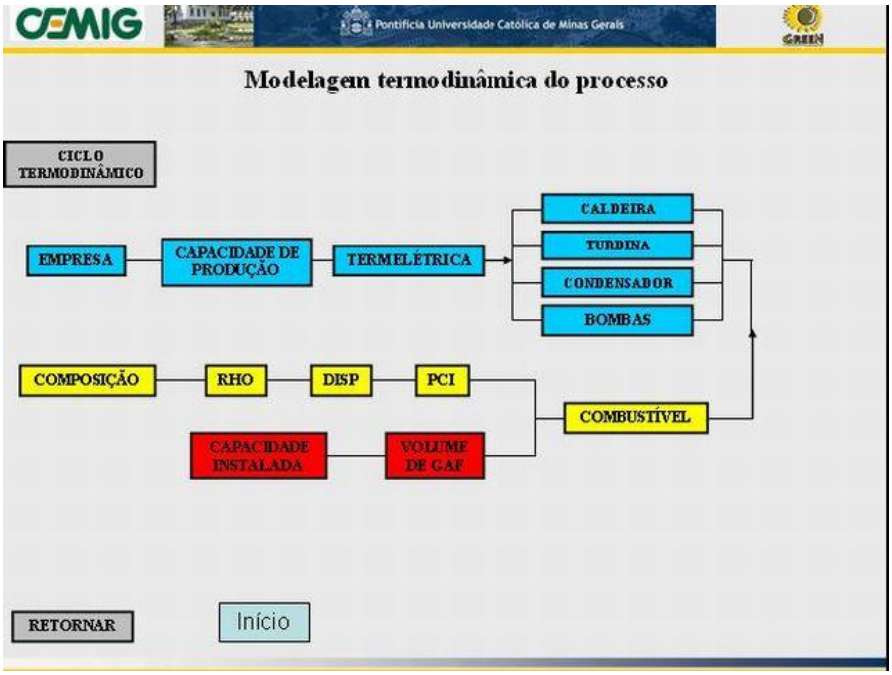


Figura 7 – Esquema de cálculos termodinâmicos para determinação de potencial de cogeração.

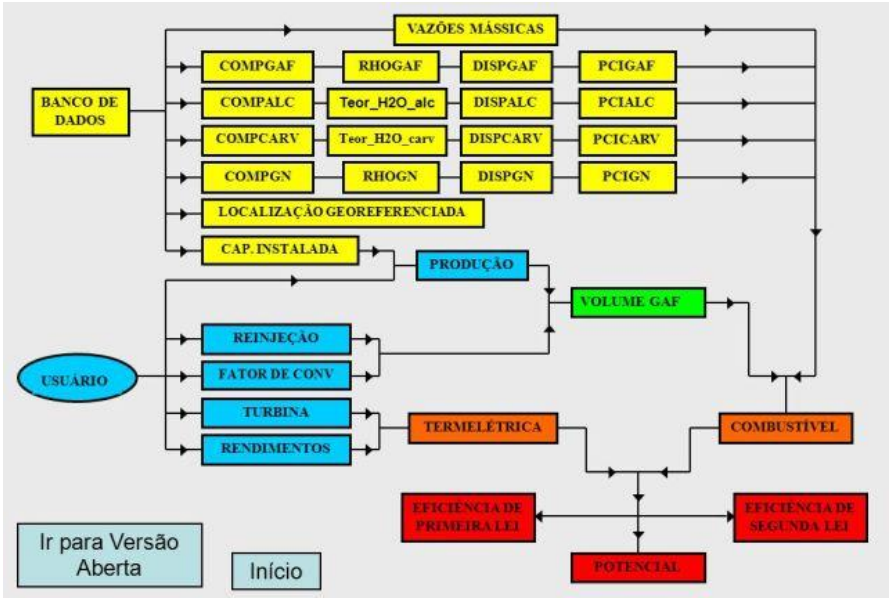


Figura 8 – Visão geral das funcionalidades desenvolvidas e disponível no programa desenvolvido.

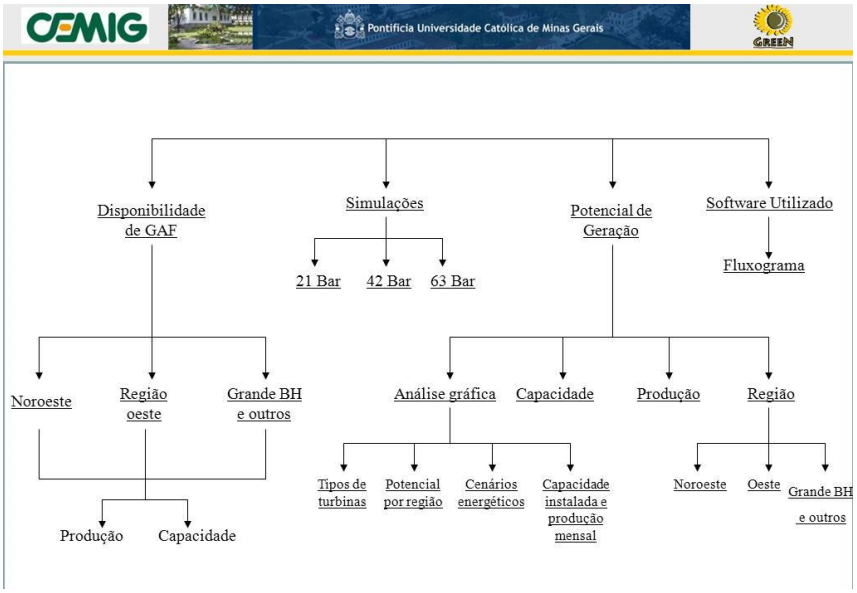


Figura 9 – Potencial de geração termelétrica por região: oeste.

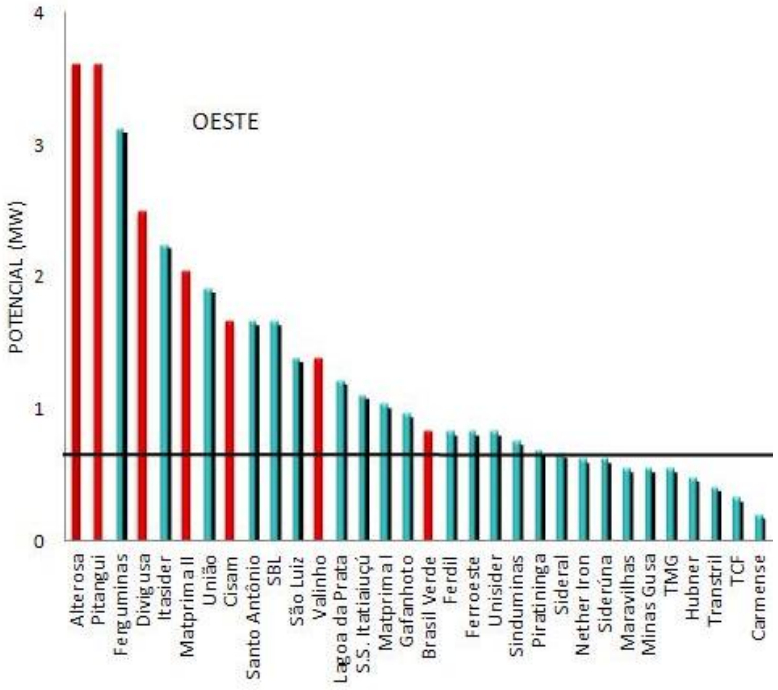


Figura 10 – Potencial de geração termelétrica por região: noroeste e BH.

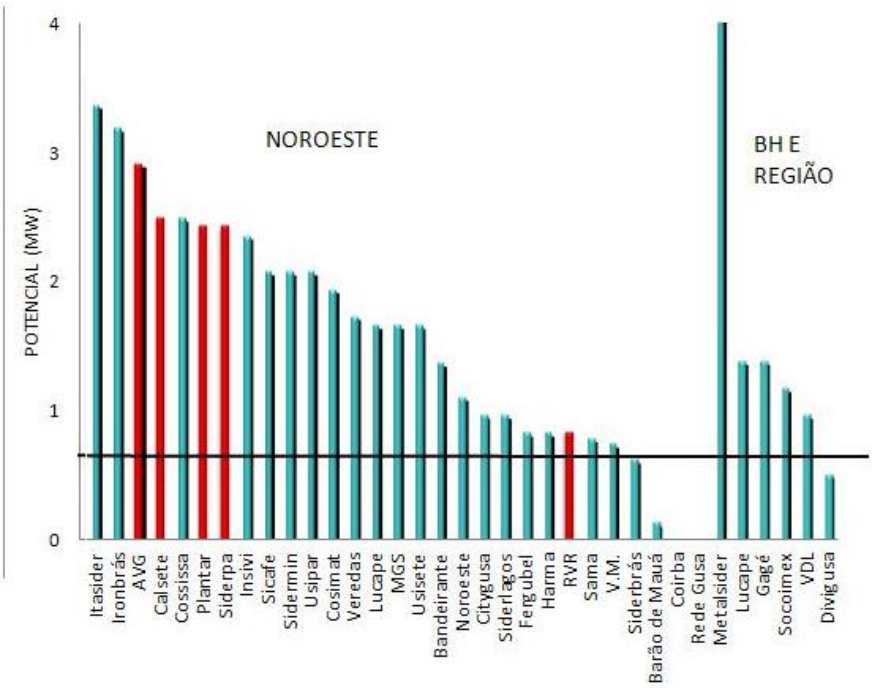
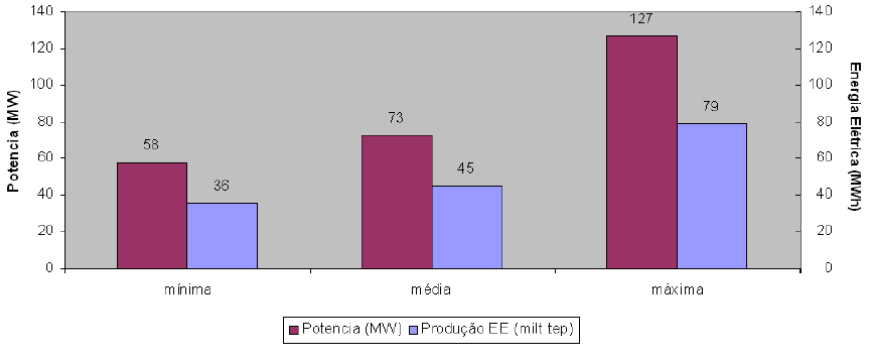


Figura 11 – Comparativo entre os limites de geração de potência elétrica (MW) e de energia elétrica (mil tep).



27.4 Conclusões

Minas Gerais possui 67 empresas do setor não integrado que produzem juntas, 5 milhões de toneladas do ferro gusa (52,4 % da produção nacional do setor não integrado), sendo que destas empresas 13 já possuem usinas termelétricas instaladas. O custo do carvão chega a representar 50% dos custos de produção do ferro gusa.

Algumas usinas instaladas nas empresas do setor não integrado, utilizam turbinas a vapor de ciclo simples com 1 ou 1,2 MW de potência por turbina, utilizando-se dois ou mais módulos para maiores potências;

O estado de Minas Gerais possui cerca de 110 altos fornos instalados, 20 estão paralisados em dez/2007. O PCI médio de um gás natural é de 40.000 kJ/Nm³ e do gás de alto forno (GAF) é de 3.900 kJ/Nm³, do alcatrão é de 18.700 kJ/kg e do pó de carvão é de 21.633 kJ/kg. Estima-se que cerca de 40% do GAF gerado no estado não é aproveitado para a geração de eletricidade (BEEMG, 2007), o que confirma o elevado potencial para cerca de 51 empresas do estado de Minas Gerais teriam GAF o suficiente para uma usina termelétrica de pelo menos 800 kW (24 com 1.000 kW). O potencial termelétrico estimado para uma produção média anual de cerca de 85% da capacidade instalada de cada uma destas 51 empresas poderiam gerar pelo menos 88 MW ou 104 MW para aproveitamento de 100% da capacidade instalada. Descontando os 31 MW já instalados, esta faixa ficaria entre 57 e 73 MW de potência elétrica passível de ser instalada.

A equipe da PUC, instituição executora, obteve o reconhecimento pelo trabalho realizado na forma de demandas por serviços de consultoria e reforço na sua condição de centro de excelência. Foram desenvolvidos, ao longo do projeto, uma iniciação cientifica (graduação) e um estágio de pós-doutorado. Além disso, os seminários de andamento do projeto eram conduzidos com a equipe da Cemig e também mestrandos e doutores do programa de pós-graduação. Tais seminários se configuraram em uma transferência tecnológica do desenvolvimento realizado no projeto e também como capacitação na área da pesquisa.

Ao final do projeto, os resultados foram apresentados aos principais agentes dos setores envolvidos tendo o reconhecimento da importância da ferramenta desenvolvida. Contudo a grande crítica é de que este estudo carece de atualização, uma vez que ele apresenta um retrato do potencial no ano de 2006/2007. Mas este é um trabalho que pode ser feito mais facilmente, uma vez que a metodologia já se encontra desenvolvida, definida e validada, se tratando então, basicamente de uma atualização de dados.

Ao final do projeto, os seus relatórios e resultados foram transferidos para a Gerência de Alternativas Energéticas da Cemig, onde está sendo prevista a atualização em 2013.

Para a Cemig trata-se de um projeto importante e relevante, na medida em que traz um maior conhecimento do setor siderúrgico e indica potenciais em produção de energia e em eficiência energética, que podem ser explorados como novos negócios pela Empresa ou suas subsidiárias, como por exemplo, a empresa ESCO do grupo Cemig: Efficientia.

Capítulo 28

Capítulo 28: Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica usando microturbinas[28]

***Resumo*- O setor siderúrgico, principalmente em Minas Gerais, faz uso intenso de carvão vegetal para a produção de aço, tanto na forma de redutor como na forma de energético. Este uso contribui para a constituição de uma matriz energética renovável no Estado. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de cogeração utilizando gases residuais do processo de pirólise lenta para a produção de carvão vegetal, resíduos sólidos do carvão vegetal e da atividade florestal de produção de eucalipto. Estimativas indicam um potencial de 125 MW em geração descentralizada no estado de Minas Gerais, representando uma oportunidade de negócios em energia e em eficiência energética para o setor de produção de carvão vegetal, aliando os setores de silvicultura, siderúrgico e de energia elétrica.**

28.1 Introdução

A lenha, no passado, se constituiu na principal fonte de suprimento energético, sendo posteriormente substituída por combustíveis fósseis. Essa substituição, ao longo de mais de dois séculos, produziu reflexos ambientais, representados pela emissão de gases de efeito estufa. Além disso, com o aumento populacional e a construção de uma sociedade baseada no uso da energia, é inevitável a constatação da condição finita dos recursos naturais.

Diante deste cenário, algumas opções se apresentam como soluções:

- Mudança nos padrões de consumo: esta é uma opção bastante complexa de ser realizada, uma vez que depende fundamentalmente de adesão pelos cidadãos, exigindo um amplo trabalho de modificação cultural, educacional e na filosofia de vida de toda a sociedade. Trata-se de uma opção que pode ser realizada pela consciência do indivíduo e também por ações de governo e de estado de maneira a transformar a sociedade. Entretanto, considerando o modelo econômico atual, sobre o qual a sociedade brasileira encontra-se alicerçada, dificilmente tal mudança será executada de forma abrangente.
- Uso de processos mais eficientes: a energia mais cara é aquele que não foi produzida no momento em que se necessitava dela, e da mesma forma, a energia mais barata é aquela que foi economizada. Sendo assim, a percepção de

[28] BARCELOS, D. C.; AMARAL, B.; BOURG, D. C.; VALÊNCIA, A.; SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V.. Publicado em VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

que ações de eficiência são fundamentais, não só do ponto de vista energético, mas também econômico, se tornam mais populares e efetivas.

- Utilização de energias renováveis: o uso destas fontes contribui não somente para a mitigação das emissões e redução do efeito estufa, como também contribui para o suprimento energético. Do ponto de vista, particular, tais fontes até podem ser confundidas ou chamadas como fontes alternativas. Contudo, observando-se cenários de planejamento e prospectivos leva a conclusão de que todas as fontes e formas de energia terão a sua aplicação e importância para a construção do sistema energético do futuro.

Neste contexto a biomassa volta a ter uma importância para o suprimento energético, aliando as duas últimas soluções listadas. No estado de Minas Gerais a lenha possui grande importância na matriz energética, respondendo por 21,4%, conforme indica o 26º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais [1]. Este valor é superior à contribuição da eletricidade, que representa 14,6% na matriz energética estadual.

A lenha é essencialmente destinada para a produção de carvão vegetal (75%) [2]. A maior parte da produção de carvão vegetal visa atender a indústria siderúrgica no fornecimento de energia e carbono para altos-fornos. A utilização do carvão vegetal é recomendável, pois está apoiada em florestas renováveis. As empresas líderes do setor alicerçam a produção nas chamadas UPC (Unidade de Produção de Carvão) ou UPB (Unidade de Produção de Biorredutor). Esta última nomenclatura foi dada para caracterizar melhor a sustentabilidade do processo produtivo e modificar a ideia de percepção associada com sujeira e insalubridade do carvão. O carvão vegetal produzido é transportado para ser utilizado nas usinas siderúrgicas [2].

Os gases resultantes da carbonização podem ser diretamente lançados na atmosfera, com elevado poder poluente, ou podem ser queimados em queimadores apropriados (flares), tendo mais, eficiência energética e geração distribuída.

Entretanto é necessário que se resolva o problema técnico de transporte destes gases de origem orgânica entre os fornos e a unidade centralizada de geração de energia e o desenvolvimento de queimadores para aproveitamento de gases residuais, juntamente com resíduos sólidos e líquidos, tanto da produção de carvão como da produção de silvicultura.

Estes são os objetivos essenciais do Projeto de P&D GT 358 (PD-4951-0358/2010) cujo principal resultado é uma planta de cogeração inovadora e demonstrativa que além da questão pontual da unidade em que se encontre instalada, demonstre que é mantida a condição requerida de combustão e que é possível realizar o aproveitamento e eficiência energética de forma técnica e economicamente viável.

A metodologia essencial para o desenvolvimento deste projeto foi a experimentação, definida de acordo com o estado da arte da tecnologia e com foco nos resultados esperados da pesquisa.

A pesquisa proposta visa resolver algumas das barreiras tecnológicas associadas, integrando o segmento de produção de carvão vegetal ao grupo de potenciais geradores de energia elétrica, através do desenvolvimento de uma tecnologia específica de geração de energia com tempos de retorno dos investimentos compatíveis com o porte das unidades. Para a concessionária de energia, este projeto possui aplicação essencial como consolidação tecnológica, subsídio para desenvolvimento de novos negócios em produção ou comercialização de eletricidade e, também, para o fomento da atividade industrial e regional.

Este projeto está sendo realizado em parceria com a empresa ArcelorMittal Bioflorestas e a Cemig GT e encontra-se em andamento com término previsto para novembro/2013, tendo 36 meses de execução.

28.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A produção de carvão vegetal ocorre basicamente da seguinte forma: produção de eucalipto, em uma área no entorno da unidade de carbonização, na forma de mosaico; a colheita, feita utilizando máquinas modernas para o corte das árvores (Figura 1a); desfolhamento e formação de toras com tamanho padronizado (Figura 1b); transporte das toras para o pátio do sistema de carbonização, onde ocorrerá a secagem, podendo inclusive haver um forno específico para este processo; acondicionamento da madeira dentro do forno para a realização da carbonização em batelada; processo de pirólise lenta, com a produção de carvão vegetal com duração de 4 dias; resfriamento do forno, também no período de 4 dias; descarga do carvão produzido e finalmente transporte do carvão vegetal para as siderúrgicas. Na descarga, os finos de carvão e tiços (madeira não carbonizada) se constituem em resíduos do processo de produção que são inúteis para o processo siderúrgico, mas que podem ser utilizadas no aproveitamento energético (Figura 1c).

Figura 1 – Colheita mecânica do eucalipto (a) e resíduos florestais (b) e resíduos de carvão vegetal (c).

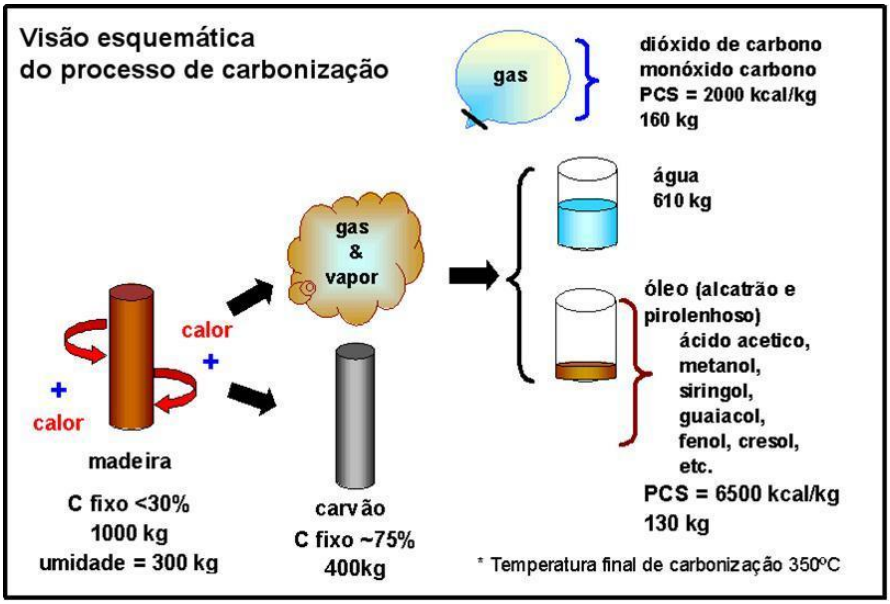
(a)

(b)

(c)

Na Figura 2 é apresentada uma visão esquemática da produção de carvão, que juntamente com a Figura 3 indica a oportunidade do uso deste recurso energético.

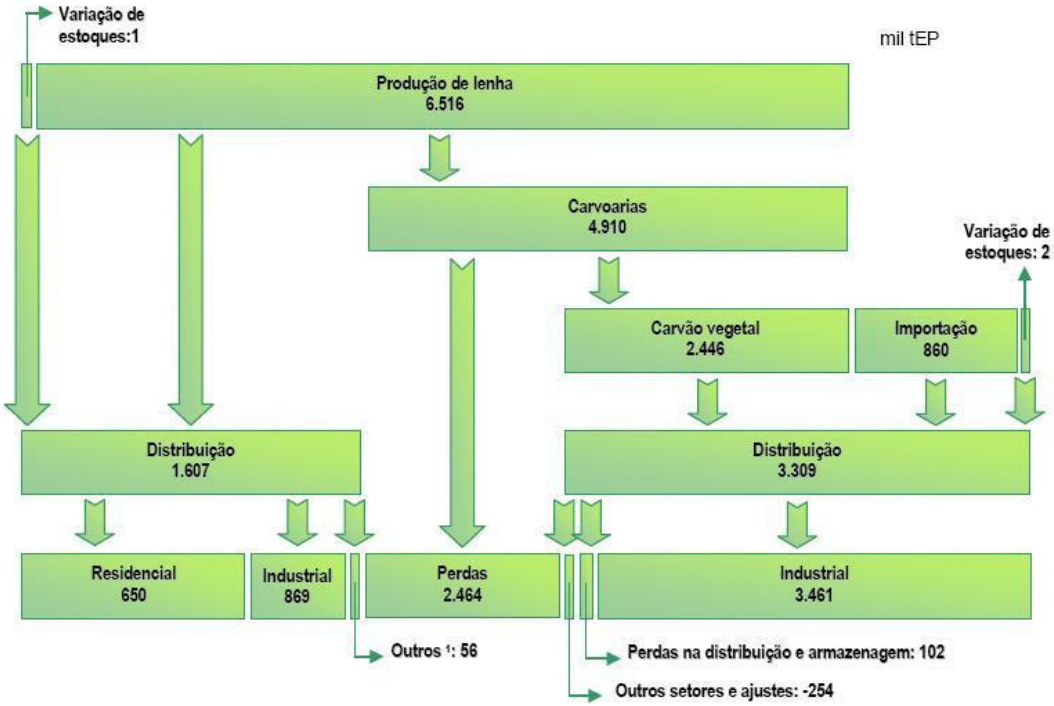
Figura 2 – Esquemático da produção de carvão vegetal [2].



Em função da programação dos fornos os gases de carbonização apresentam uma composição altamente instável e variável. Esta característica agrega complexidade para a produção de eletricidade.

Para a produção do carvão vegetal em escala industrial nas UPC's, são utilizadas dezenas de fornos de alvenaria com grandes dimensões, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 3 – Fluxo energético da lenha e a oportunidade em eficiência energética.



[1] Setores comercial e agropecuário, destilarias e centrais elétricas autoprodutoras.

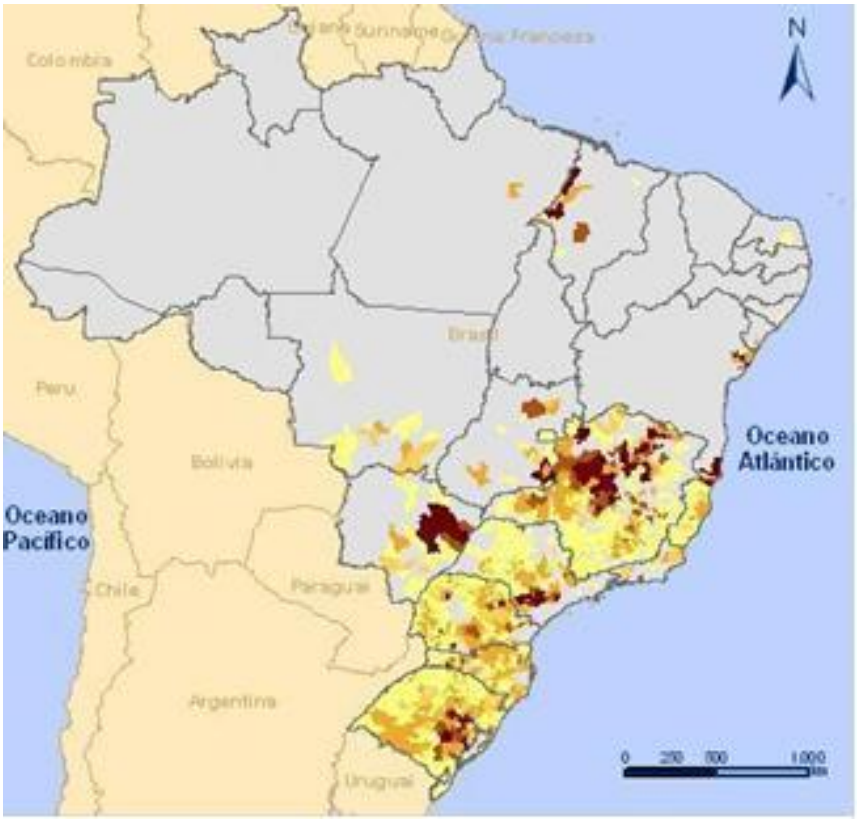
O projeto será implantado na UPC Buritis, localizada na Cidade de Martinho Campos/MG, conforme indica a Figura 5. Esta UPC é composta de 36 fornos de grandes dimensões. Cada um deles comporta 225 m³ de madeira, resultando em uma produção de 185 metros de carvão (MDC).

Figura 4 – Fornos para a produção de carvão vegetal – 225 m^3.

Na Figura 6 é possível observar que a localização da produção de carvão vegetal encontra-se coincidente com regiões de baixa produção de eletricidade, com rede elétrica fraca e na região de semiárido do estado de Minas Gerais (área da SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste). Além da possibilidade de melhoria na rede elétrica, existe ainda a possibilidade de atendimento de comunidades isoladas.

Figura 5 – UPB Buritis em Martinho Campos/MG.

Figura 6 – Produção de combustíveis de madeira de silvicultura (t) [3].



A. P&D Cemig/Aneel GT 358

O projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado "Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica com microturbinas" – P&D CEMIG/ANEEL GT358 foi iniciado em novembro/2010 e tem o seu encerramento previsto para novembro/2013, com duração de 36 meses. Resultou da parceria entre a CEMIG Geração e Transmissão SA e a ArcelorMittal Bioflorestas, tendo um custo de total aproximado de R$8,5 milhões, sendo que deste valor R$2,6 milhões faz parte da contrapartida oferecida pelo parceiro aos recursos do P&D Aneel. Seus principais objetivos, de forma mais detalhada foram [4]:

- Desenvolver uma base de conhecimento sobre os gases gerados durante a carbonização da madeira permitindo o desenvolvimento de um sistema de transporte de gases eficiente dentro da UPC. O sistema de transporte desenvolvido gerará patente;
- Construir um sistema protótipo de tubulações, exaustores, drenos, aquecedores, revestimentos que conduzam eficientemente os gases de carbonização ge-

rados nos fornos até uma posição central onde estaria situada a unidade de geração de energia elétrica;

- Construir e testar um sistema contendo uma microturbina EFGT (turbina de queima externa). A microturbina será adquirida para compor o sistema e agregar conhecimentos técnicos não envolvendo a geração de patente;
- Testar os limites de desempenho da turbina considerando-se as temperaturas limites de trabalho e revestimentos de proteção térmica passíveis de aplicação.
- Estabelecer os parâmetros e malhas de controle do sistema para as condições de partida, aquecimento, aceleração, geração, parada. A metodologia desenvolvida poderá ser patenteada;
- Desenvolver uma base de conhecimento sobre os resíduos sólidos gerados na cadeia produtiva do biorredutor de forma a permitir a coleta, o pré-processamento, o transporte eficiente, o beneficiamento, a classificação e a sua queima em fornalhas híbridas (biomassa/gás de carbonização) em unidades de geração de elétrica associadas às unidades de processamento de biorredutor. Os equipamentos desenvolvidos serão patenteados;
- Construir um protótipo móvel de classificação e pré-secagem de finos de biorredutor integrado ao processo produtivo de forma a realizar coleta dos resíduos no momento da descarga dos fornos. O equipamento desenvolvido será patenteado;
- Construir uma central de processamento de resíduos de explorações florestais que pique, padronize e classifique os resíduos para ser utilizado na queima das fornalhas. A central de resíduos será patenteada;
- Desenvolver uma fornalha híbrida (gás de carbonização/finos de biorredutor/resíduos de madeira que queime simultaneamente ou não resíduo sólido e gás de carbonização). A fornalha será patenteada;
- Capacitar tecnicamente o segmento industrial de produção de biorredutor como um potencial fornecedor de energia elétrica.

O principal produto deste projeto será: um sistema piloto de cogeração de energia composto de sistema de transporte de gases, desenvolvido na pesquisa, de microturbina EFGT importada, trocador de calor, sistema de controle automatizado, fornalha de queima de gases de carbonização, executados de forma a promover a viabilidade técnica e fornecer elementos para viabilidade econômica para negócios em energia e em eficiência energética.

B. Metodologia

A metodologia de desenvolvimento deste projeto será:

- Modelagem matemática do sistema;

- Projeto do sistema de gases de carbonização. O desafio é transportar os gases sem que haja condensação de água e alcatrão na tubulação;
- Construção e testes do sistema de transporte de gases. Neste ponto será demonstrado que os gases são capazes de manter condição de combustão e de produção de energia;
- Avaliação de tecnologias de produção de energia e turbina EFGT. A justificativa desta opção se deve ao fato de que o gás residual teria dificuldades em manter a condição de combustão em um sistema de caldeira convencional. As turbinas a gás não poderiam ser aplicadas diretamente neste caso, pois existe a presença de partículas e alcatrão que reduziriam significativamente a vida útil do equipamento inviabilizando a aplicação da tecnologia. O sistema EFGT basicamente se trata de uma turbina aeronáutica onde o fluido de trabalho é o ar. Neste caso para se elevar a temperatura do ar é feita a troca de calor em um queimador para onde os gases residuais são conduzidos e queimados;
- Projeto do sistema de cogeração;
- Inventário florestal e estudo do sistema de aproveitamento de biomassa florestal residual;
- Construção do sistema de cogeração e de aproveitamento de biomassa florestal residual;
- Elaboração de procedimentos operacionais e treinamentos de segurança;
- Testes e ajustes integrais no sistema protótipo;
- Análise técnica, econômica, ambiental e energética do sistema, revisão e consolidação de resultados do projeto.

C. Benefícios do Projeto

A concessionária pode se beneficiar pelo desenvolvimento da tecnologia de diversas formas, dentre elas: registro e exploração de patentes e *royalties*, aplicação de geração distribuída e fornecimento de energia em comunidades isoladas próximas a unidades de produção de carvão, comercialização de energia elétrica, oportunidades para a empresa ESCO (empresa de serviços de conservação de energia) da Cemig – Efficientia.

O setor siderúrgico se beneficiará na medida em que poderá se tornar autoprodutor e/ou exportador de eletricidade, além dos ganhos ambientais pela redução de emissão na cadeia produtiva do setor siderúrgico.

O ganho para o setor elétrico está associado com o desenvolvimento de ampliação da matriz renovável e com ganhos em eficiência. Já a sociedade terá o benefício de formação de recursos humanos para lidar com o tema, além de possibilidades industriais advindas das realizações deste projeto.

D. Gerenciamento do Projeto

Considerando a complexidade do projeto, desde o seu inicio foi pensada a utilização das melhores práticas em gerenciamento de projetos, preconizadas pelo PMI (*Project Management Institute*).

Esta ação se constitui essencialmente na estruturação de um plano de projeto onde as 9 áreas de gerenciamento de projetos: escopo, custo, prazo, qualidade, recursos humanos, comunicação, risco, aquisição e integração foram consideradas para a realização do projeto em todas as suas fases. A seguir será apresentada de forma breve um extrato essencial do plano de gerenciamento do projeto.

Critérios de aprovação dos produtos:

1. Documentação conforme legislação e manual Aneel 2008;

2. Conformidade com relação ao que está proposto no Plano de Trabalho anexo ao convênio e aos requisitos do projeto;

3. Solicitações de mudanças realizadas e aprovadas pelo gerente do projeto;

4. Projeto conduzido e encerrado conforme as melhores práticas em gerenciamento de projetos e atendendo aos requisitos de projeto nas dimensões: custo, prazo, qualidade e escopo;

Com relação aos produtos os critérios são os seguintes:

5. Sistema de condução de gases montado e funcionando;

6. Sistema de aproveitamento de resíduos de biomassa florestal montado e funcionando;

7. Sistema de geração de energia, constituído por queimador central, turbina EFGT e gerador, montado e funcionando.

Na Figura 7 é apresentado o cronograma, usando os marcos de entrega do plano de gestão do tempo. A Figura 8 apresenta a curva "S" do projeto, indicando a gestão de custos ao longo do projeto. A relação institucional ocorrerá conforme determinado na Figura 9, que trata da gestão dos recursos humanos. Já nas tabelas I e II é ilustrado o plano de comunicação, que se mostra essencial ter um estabelecimento claro da relação entre as instituições e na comunicação a ser desenvolvida ao longo do projeto.

Além disso, cabe ressaltar que a execução do projeto tem o suporte de um escritório de projetos da ArcelorMittal Bioflorestas, realizando o desdobramento executivo do gerenciamento de projetos para o nível de equipe técnica executiva, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 7 – Plano de gestão do tempo no projeto.

Id	Nome da tarefa
0	**Projeto GT 358**
1	**1 Modelagem no sistema Gate Cycle**
3	1.2 Relatório de simulações do sistema
4	**2 Anteprojeto do sistema de transporte de gases**
6	2.2 Relatório contendo o anteprojeto
7	**3 Projeto do sistema de transporte de gases**
10	3.3 Relatório técnico
11	**4 Projeto técnico-executivo - Co-geração**
13	4.2 Relatório de opções técnicas de aquisição
15	**5 Construção do segmento de transporte de gases e testes**
26	5.5 Relatórios: desempenho, simulação e testes
27	**6 Estudo logístico: ampliação da capacidade de biomassa**
29	6.2 Relatório de estudo de biomassa complementar
30	**7 Revisão do projeto da rede de transporte de gases**
34	7.4 Documentação do projeto revisado
35	7.5 Relatório com simulação matemática
36	**8 Construção do queimador central de fumaça**
40	8.4 Relatório contendo: procedimento operacional, memorial operacional e
41	**9 Construções Efetivas**
52	9.4 Relatório de desempenho da rede e descritivos da etapa
54	**10 Testes e ajustes do sistema de aproveitamento de resíduos**
56	10.2 Relatório de evolução de aproveitamento de resíduos
57	**11 Testes finais no protótipo**
61	11.4 Relatório contendo: conformidade técnica, fornecedores e atendimer
62	**12 Consolidação dos resultados**
79	12.8 Relatório Final contendo todas as informações consolidadas para o E

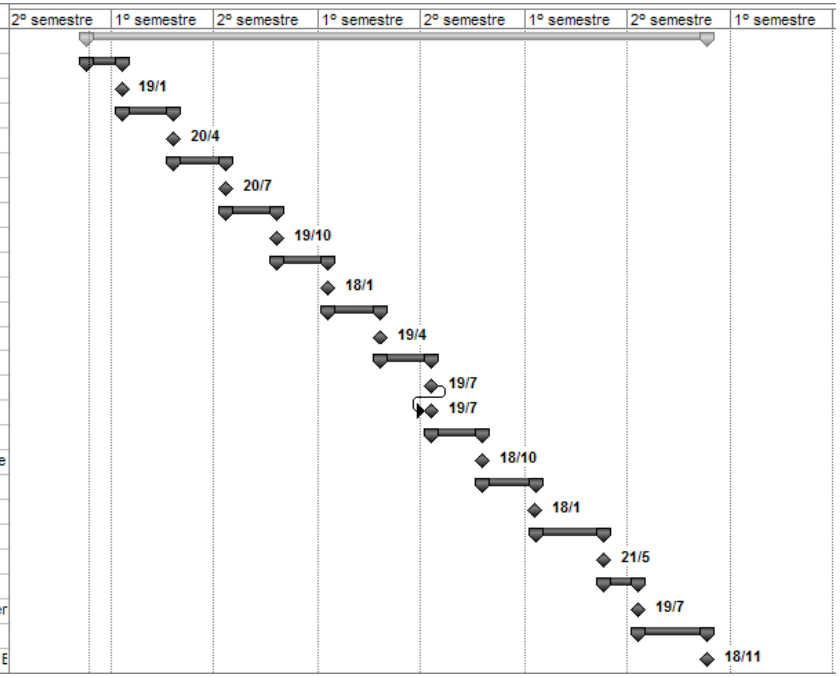


Figura 8 – Curva “S” no projeto GT358 – gestão dos custos.

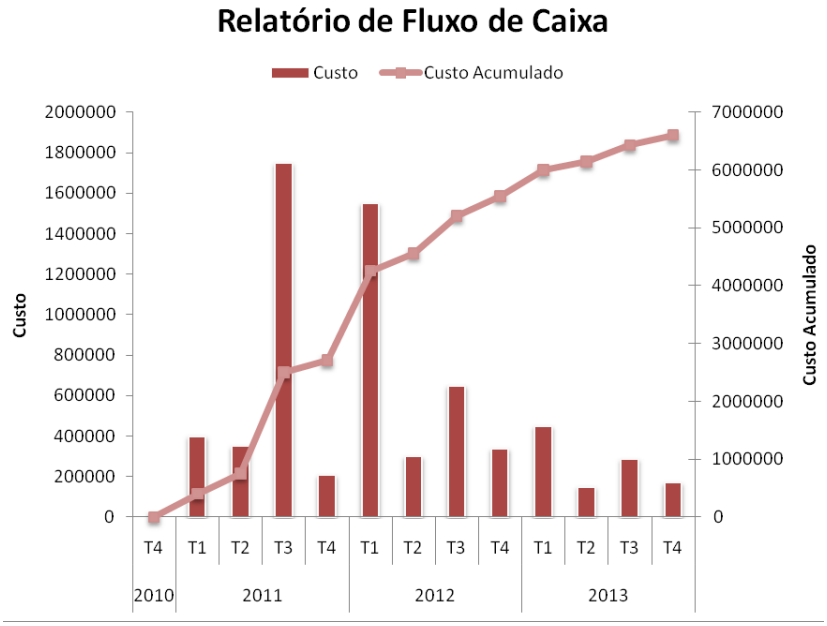


Figura 9 – Relação institucional no contexto do P&D GT 358.

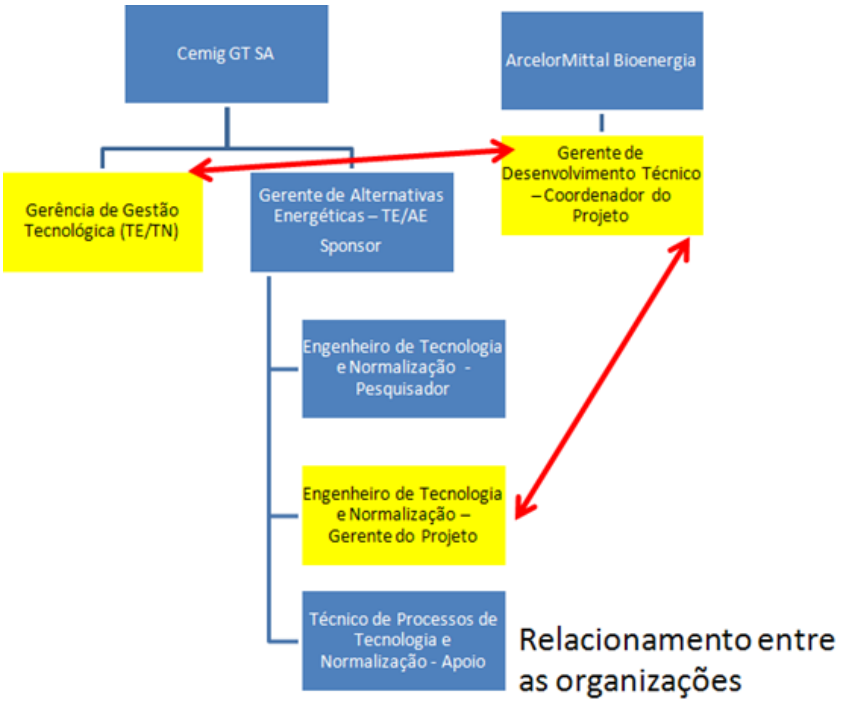


Tabela I – Definição dos documentos do projeto.

	Emissor	**Receptor**	**Periodicidade**	**Mídia Utilizada**	**Formato**
Project Charter	Superintendência	Gerente do Projeto	Após a celebração do convênio	Papel	Texto
Planejamento orçamentário do projeto	Gerente do projeto	Administrativo	Início do projeto	Digital	Tabela
Plano de projeto	Gerente do Projeto	Coordenador e equipe do projeto	Na reunião de Kickoff Meeting	Digital	Texto
Pedido de mudança de cronograma	Coordenador do projeto	Gerente do Projeto	Assim que necessário	Digital	Texto ou tabela
Pedido de mudança de custos	Coordenador do projeto	Gerente do Projeto	Assim que necessário	Digital	Texto ou tabela
Autorização de mudança	Gerente do Projeto	Coordenador do projeto	Aprovação da solicitação de mudança	Digital	Texto ou tabela
Relatório de produto	Coordenador do projeto	Gerente do projeto	Entrega de produto	Digital	Texto, tabela, gráficos e fotos
Relatório progresso	Coordenador do projeto	Gerente do projeto	Mensal	Digital	PPT
Aceite de produto	Gerente do projeto	Coordenador do projeto	Após aprovação do produto	Papel Digital	Texto
Relatório de *status*	Gerente do projeto	Sponsor	Mensal após consolidação do desempenho	Papel Digital	PPT
Ata de reunião	Gerente do projeto	Coordenador do projeto	Mensal	Digital	Texto
Lições aprendidas	Coordenador do Projeto	Gerente do Projeto	Mensal	Papel Digital	Texto
Relatório final	Coordenador do projeto	Gerente do projeto	Encerramento do projeto	Papel Digital	Texto
Relatórios quadrimestrais	Gerente do Projeto	TE/TN	A cada 4 meses	Digital	Texto
Relatório Final e artigo	Gerente do Projeto	TE/TN	Encerramento Técnico e contábil do projeto	Formulário de projeto Aneel	Texto, tabela, gráficos e fotos

Tabela II – Definição das reuniões do projeto.

Reunião	**Convocador**	**Participantes**	**Periodicidade**	**Local**	**Duração**
Kickoff Meeting	Gerente do projeto	Toda a equipe	Após celebração do convênio e antes do início executivo do projeto	UPB Martinho Campos ou Cemig Sede	4 h
Acompanhamento (desempenho, riscos, lições aprendidas, mudanças e questões)	Gerente do projeto	Coordenador e indicados da equipe que tenha informações a serem tratadas	A ser agendada oportunamente Pode ter periodicidade variável a depender da necessidade do projeto	UPB Martinho Campos ou Cemig Sede	4 h
Mensal - s*tatu*s	Gerente do projeto	Sponsor e outros participantes de coordenação de interesse convidados pela Cemig	A ser agendada oportunamente	SA/16/B1 Sala da TE/AE	1 h
Evento técnico	Coordenador do projeto	Equipe do projeto e convidados	Anualmente, após o encerramento das atividades prevista para cada ano	A ser definido (Organização pela ArcelorMittal)	16 h

Figura 10 – Gerenciamento de projetos pelo lado do executor – capa do relatório de desempenho de produto e as diversas dimensões exploradas.

É interessante observar que: o custo, escopo, prazo e qualidade encontram-se completamente definidos pelo instrumento jurídico da parceria (convênio). A gestão da qualidade, a gestão de risco e a gestão de aquisições são atribuições exclusivas da equipe executora. Além disso, a gestão da integração é feita essencialmente pelo controle das mudanças no ambiente de projeto.

A elaboração e execução do plano de projeto, tendo como balizador o uso das melhores práticas em gerenciamento de projetos, se mostrou extremamente útil para o conhecimento e o domínio das questões gerenciais do projeto. Entretanto os benefícios encontram-se limitados a questões de gestão, não interferindo em problemas de natureza da pesquisa. A grande contribuição das melhores práticas encontra-se na definição clara de atribuições e responsabilidades, definição de documentos e contatos, minimizando os ruídos de comunicação e relacionamento no ambiente do projeto, conforme já pôde ser observado e vivenciado em outros projetos de pesquisa e desenvolvimento.

E. Problemas e Dificuldades

As dificuldades relatadas para este projeto coincidem com as dificuldades que, de maneira geral, atingem a todos os projetos de pesquisa, como por exemplo:

- Ambiente altamente regulado e burocrático. Fazer pesquisa significa necessariamente estar em um ambiente sujeito a incertezas e de elevado risco. Entre-

tanto, considerando-se a forma de contratação e acompanhamento de projetos, é necessário que a pesquisa seja praticamente realizada anterior ao convênio do projeto, uma vez que firmado o instrumento jurídico, existe uma margem muito pequena de flexibilidade e manobra para acomodar as modificações a que o projeto encontra-se sujeito, restando então apenas a execução;

- Pouco conhecimento pelos parceiros dos tramites e funcionamento do programa, além da complexidade natural do processo;
- Dificuldades de se encontrar pesquisadores, fornecedores e mão de obra especializada para se realizar as atividades previstas para o projeto.

Note estas questões estiveram presentes no projeto, mesmo fazendo-se uso das melhores práticas em gerenciamento.

28.3 Resultados Preliminares e Discussão

Os resultados do projeto serão apresentados apenas de forma ilustrativa, uma vez que a dedução passo a passo compõe a extensa documentação do projeto.

A. Modelagem e simulação do sistema

A Figura 11 apresenta a estrutura de implantação do projeto e a forma de construção do sistema de transporte de gases de forma que não haja condensação de voláteis condensáveis e alcatrão, cuja condição se constitui no maior gargalo para aplicação do transporte de gases. Na Figura 12 é apresentada a simulação para o segmento de transporte de gases, resultante da modelagem científica (cinética, termodinâmica e fenômeno de transporte do processo), onde é possível verificar que a temperatura se mantem acima do valor de condensação do alcatrão (150º C)[5].

B. Anteprojeto do sistema de transporte de gases

Esta etapa teve como produto o fluxograma de engenharia do projeto. Na Figura 13 é apresentada a vazão mássica simulada, baseada em condições experimentais, e considerando um conjunto de 12 fornos, e na Figura 14 é apresentado o PCI (poder calorífico inferior) disponível em função da programação de produção de carvão.

Figura 11 – Arquitetura da parte de queima de geração de eletricidade, resultante da etapa de modelagem do projeto.

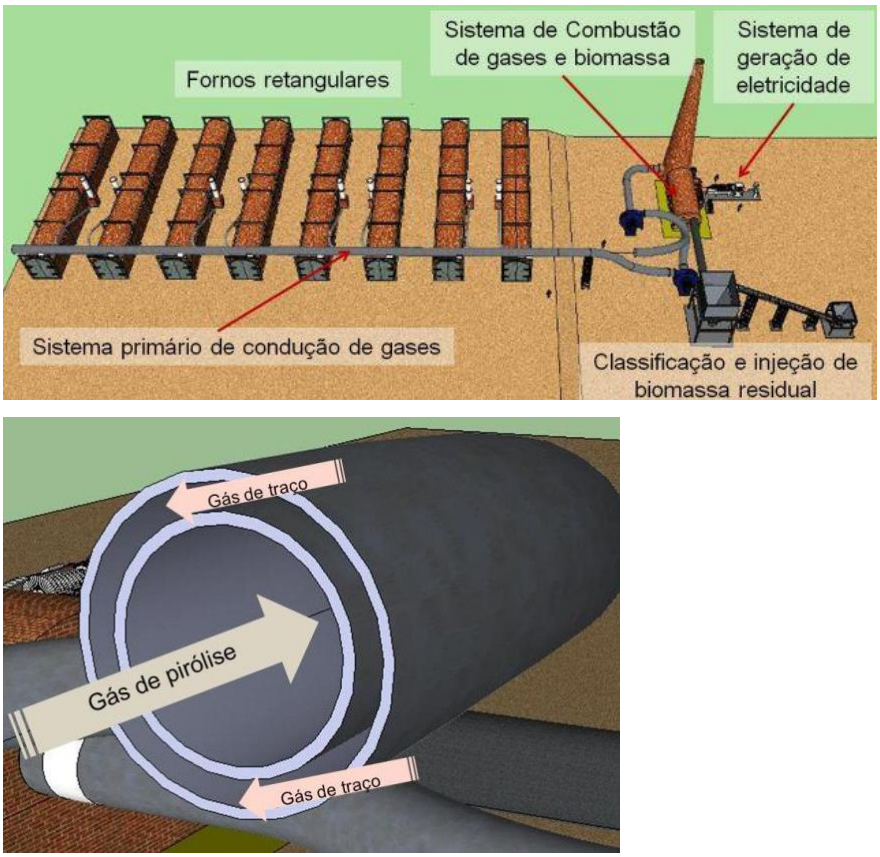


Figura 12 – Sistema de transporte de gases de carbonização.

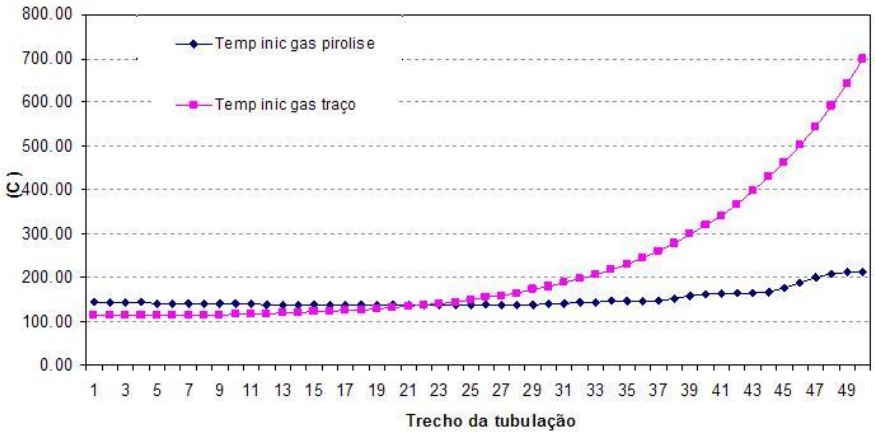


Figura 13 – Vazão mássica para o conjunto de 12 fornos.

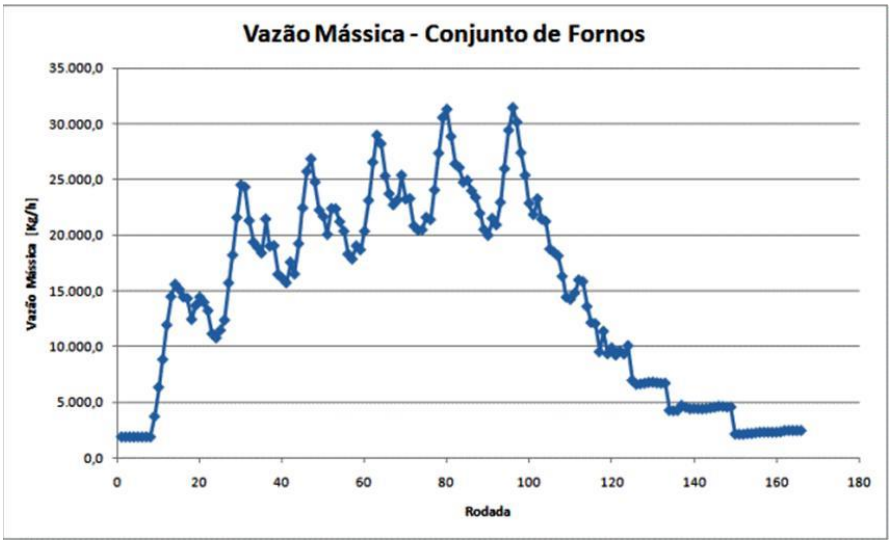
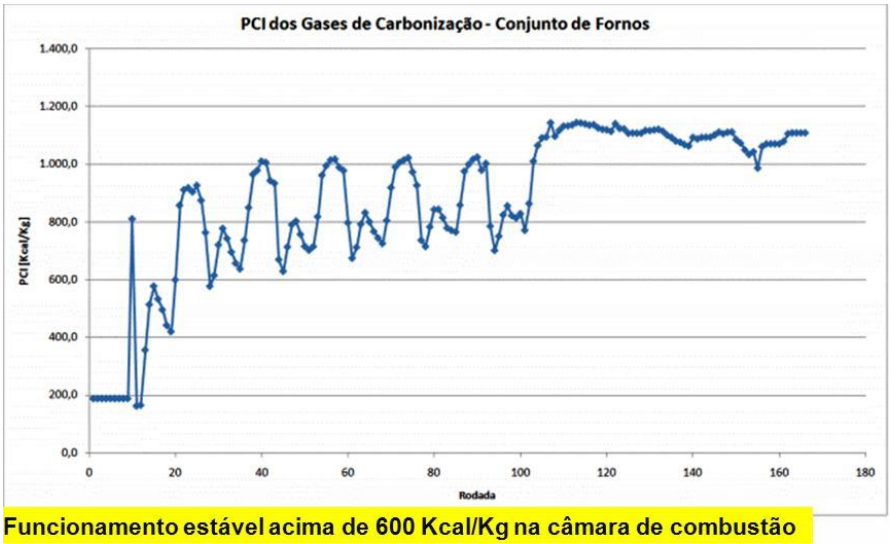


Figura 14 – PCI para o conjunto de 12 fornos.



Funcionamento estável acima de 600 Kcal/Kg na câmara de combustão

Na Figura 15 é apresentado o fluxograma de engenharia para o segmento de testes do sistema de transporte de gases [6]. Na Figura 16 é mostrado o segmento em testes, cujos resultados apresentam sucesso com relação às expectativas para o desempenho do sistema.

C. Projeto do sistema de transporte de gases

Na Figura 17 é apresentado o resultado de simulação para produção de eletricidade aproveitando os gases de carbonização. Na Figura 18 é apresentado o projeto de arranjo físico da unidade de transporte de gases de carbonização [7].

D. Projeto técnico executivo da cogeração

Na Figura 19 é apresentado o resultado para o projeto executivo do queimador central em modelagem fluidodinâmica. A Figura 20 apresenta o projeto executivo do sistema de cogeração. [8]

A escolha do acionador primário (turbina EFGT) teve como base um levantamento do estado da arte da tecnologia, cuja conclusão mapeou este mercado, indicando 3 possíveis fabricantes fornecedores desta tecnologia para o projeto, sendo eles: Btola, Talbots e Turbec.

O sistema EFGT fixa exigências menos restritas em relação à composição e limpeza do gás de combustão, pois por dentro da turbina passa apenas com ar a alta temperatura, possuindo a vantagem de permitir a queima de combustíveis alternativos, como por exemplo, biomassas. A pequena potência da unidade de geração possibilita a existência de unidades descentralizadas, destinadas para diversos tipos de biomassas provenientes de processo agrícolas e de silvicultura. O queimador trabalha sob pressão atmosférica, o que dispensa o processo de compressão do combustível [8]. A Figura 21 mostra que a diferença essencial da turbina EFGT encontra-se na adição de um sistema de troca térmica e uso do ar como fluido. A Figura 22 mostra a turbina no site onde será instalada a planta experimental.

Figura 15 – Fluxograma de engenharia para o segmento de testes.

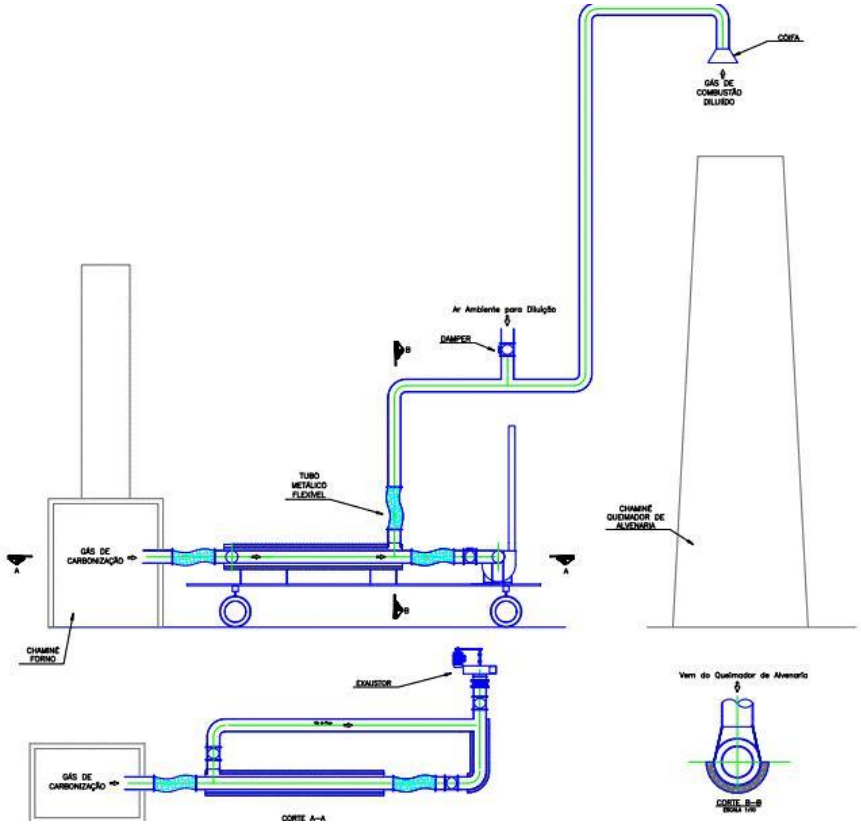


Figura 16 – Segmento de tubulação de transporte de gases de carbonização em testes.

Figura 17 – Previsão de geração elétrica para o conjunto de fornos.

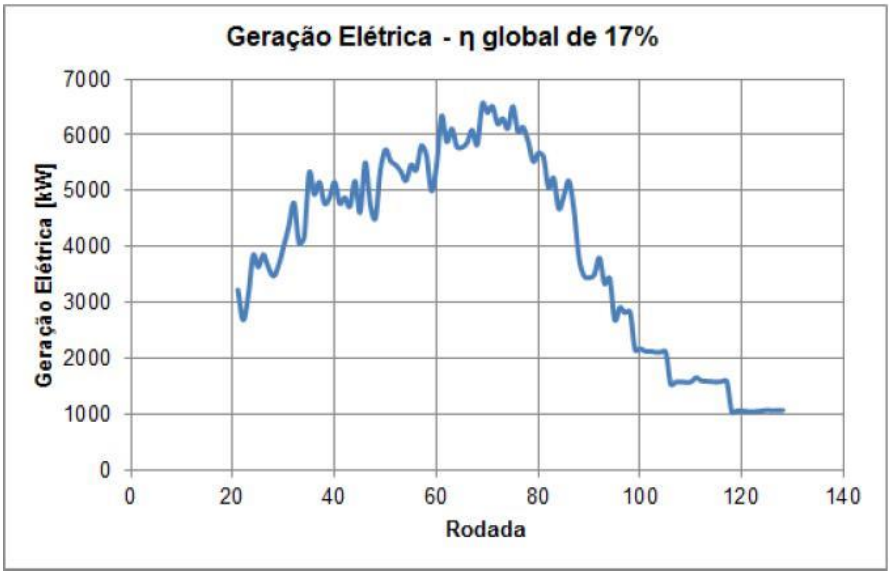


Figura 18 – Arranjo físico da planta de cogeração.

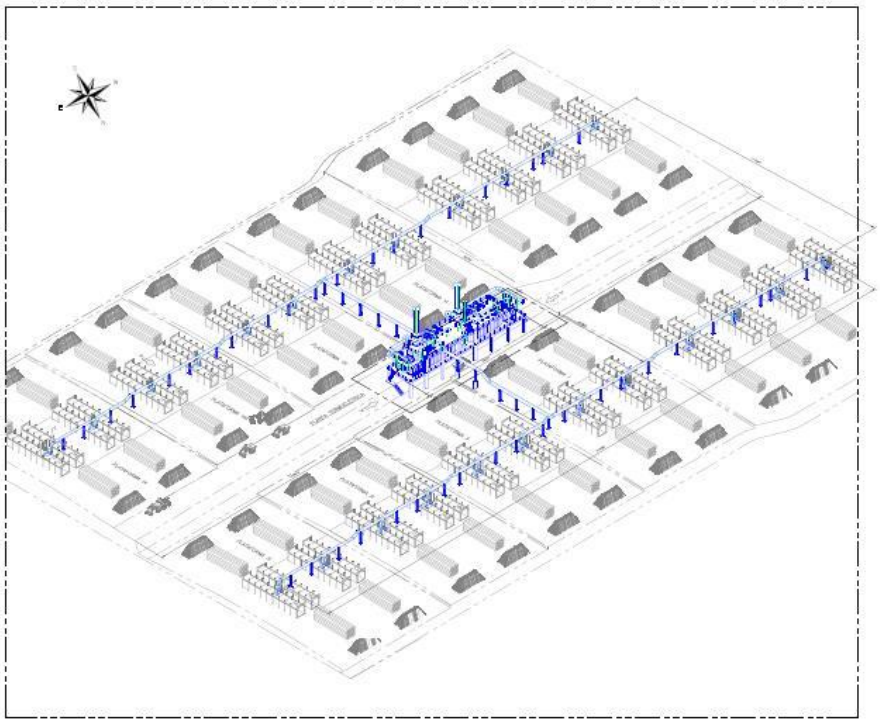
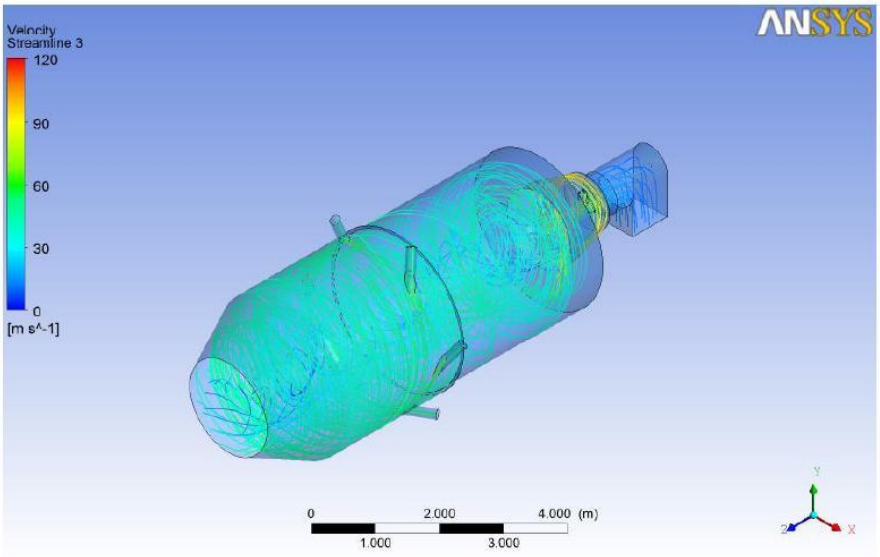


Figura 19 – Sistema de combustão - Modelagem.



Foi realizada uma visita técnica internacional em unidades EFGT instaladas na Itália e Filipinas e cujas conclusões levaram a definição do fornecedor do sistema: Genera (Itália). A importação do equipamento foi realizada durante 2012 e em março/2013 a turbina foi entregue na UPC Buriti em Martinho Campos. A Figura 22 mostra os equipamentos da turbina no local, prontos para serem montados.

E. Estudo da biomassa complementar

Conforme apresentado no projeto de estudo 2009 da CEMIG/ArcelorMittal uma UPC que produz aproximadamente 20.000 MDC/mês teria um potencial de geração de eletricidade próximo de 1,5 MW usando apenas resíduos sólidos da cadeia produtiva, o potencial de resíduos pode ser assim classificado:

- Resíduo de exploração florestal: 0,35 MW;
- Finos de carvão: 0,65 MW;
- Casca de madeira: 0,5 MW.

A viabilidade do uso dos resíduos sólidos na cadeia produtiva aumentaria em mais de 50% o potencial da fonte de geração elétrica prevista a partir do gás de carbonização das UPCs [9]. Na Figura 23 é apresentada a configuração do aproveitamento de resíduos.

A picagem dos resíduos florestais será efetuada logo após o transporte da madeira, aproveitando-se a garra de carga e será feita por um picador florestal a disco, móvel, modelo PDF 320, com motor diesel.

O sistema de classificação e limpeza utiliza o peneirador modificado para eliminação de terra e resíduos não aproveitáveis (pedras, tijolos, materiais ferrosos e outros) para posterior picagem a armazenamento em local seco e seguro. Trata-se da mesma concepção do peneirador móvel hoje existente com alteração para recebimento de mesa de rolos alternados e com inversão de rotação, visando a limpeza por gravimetria diferenciada.

Figura 20 – Projeto executivo do sistema de cogeração.

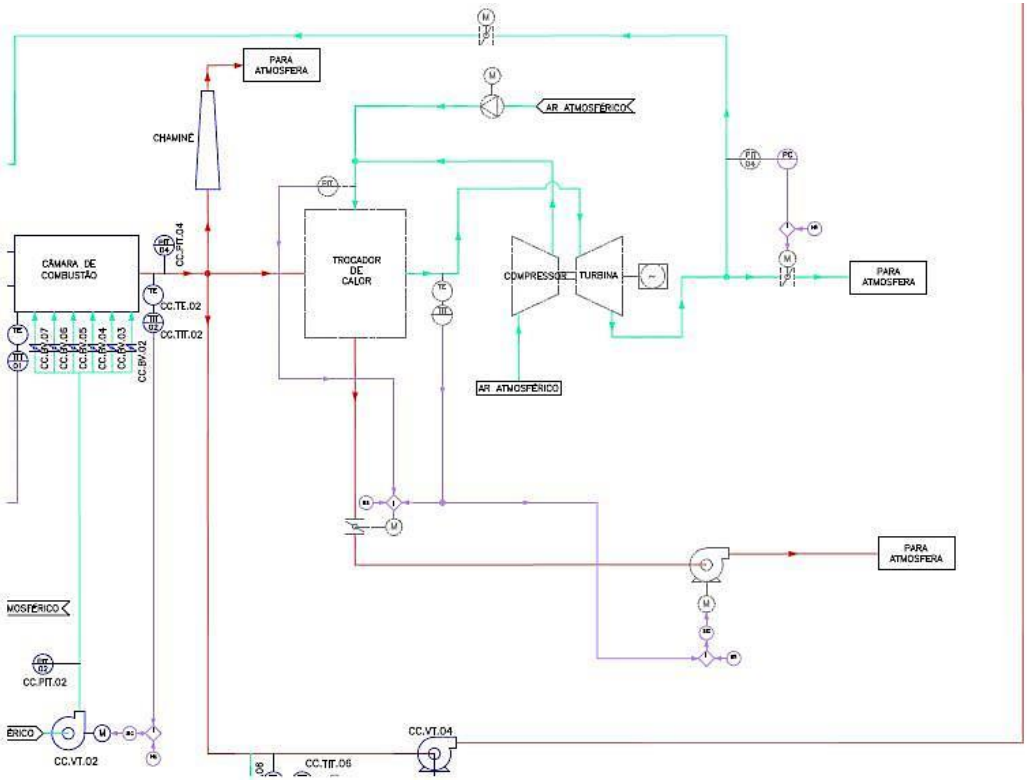


Figura 21 – Turbina EFGT – esquemático de funcionamento.

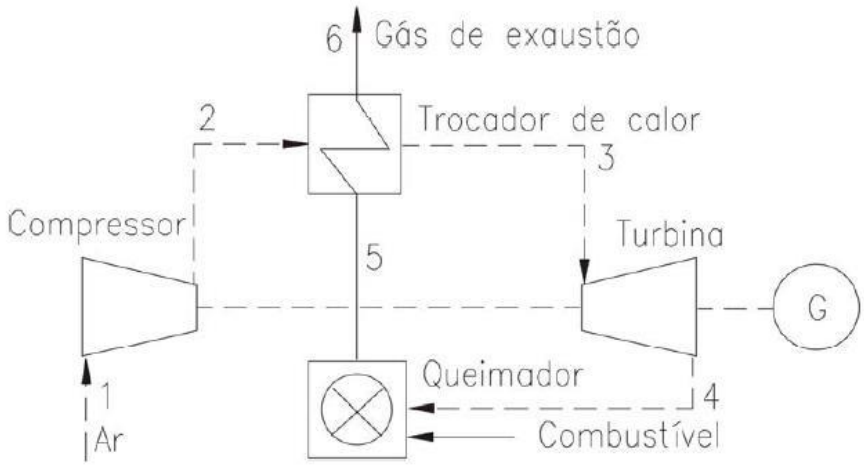
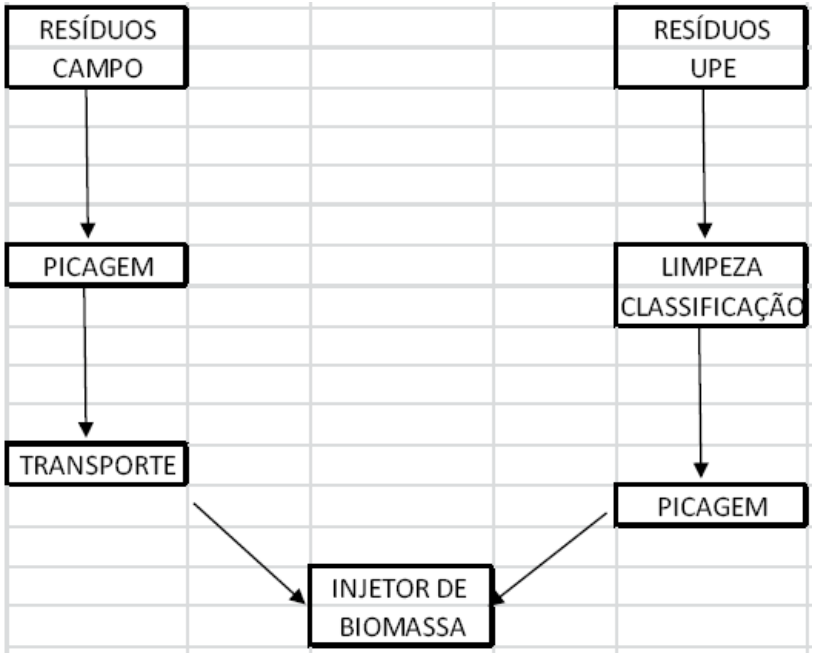


Figura 22 – Turbina EFGT no site onde será montada a planta piloto.

Figura 23 – Fluxograma básico para o aproveitamento de resíduos.



Para a injeção dos resíduos florestais, duas opções serão testadas: injeção de biomassa diretamente na câmara de combustão e gaseificação e injeção do gás na câmara, conforme indicam as Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Concepção do sistema de injeção direta de biomassa.

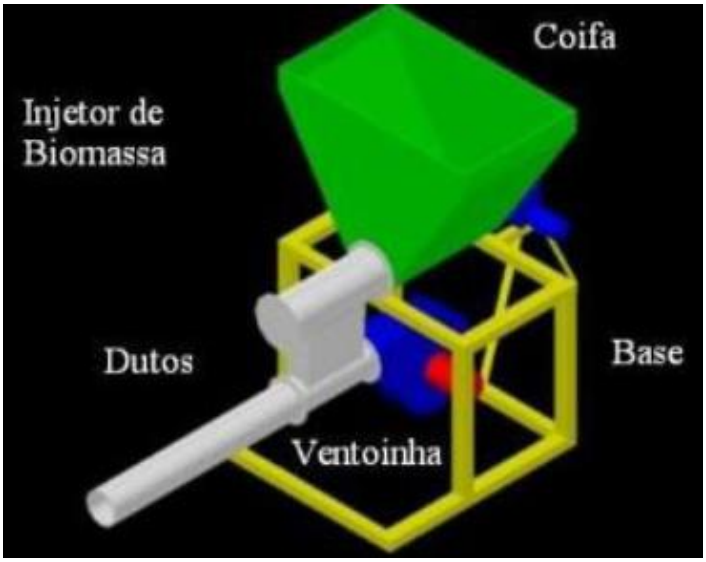
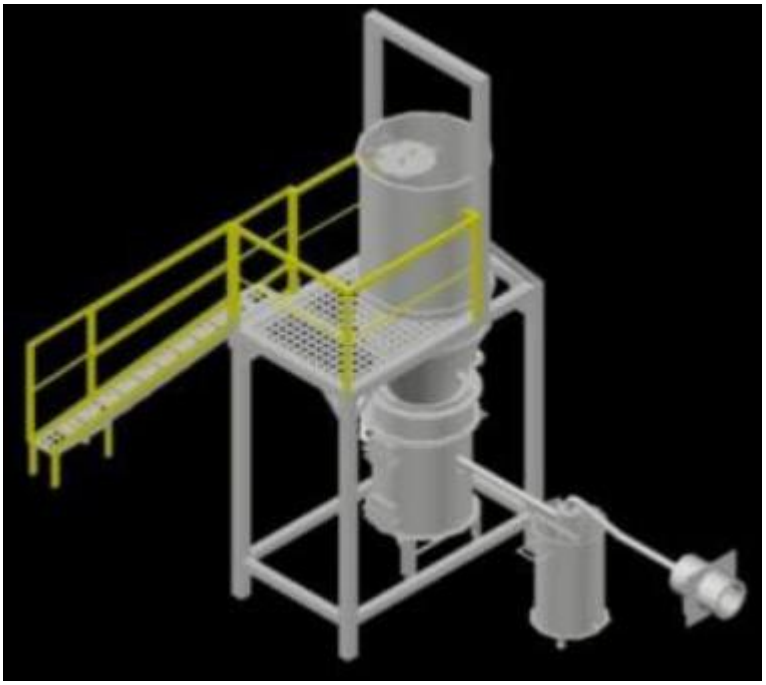


Figura 25 – Concepção do sistema de injeção de biomassa por gaseificação.



O inventário de resíduos a serem utilizados indica[10]:

- O aproveitamento energético de folhas e galho deve resultar em 25.206 $kW.h.ha^{-1}$ de energia;
- A casca contribui com 8,5% da massa seca total, resultando em 39.837 $kW.h.ha^{-1}$ de energia caso fossem completamente utilizadas. Entretanto, perdas de casca foram identificadas durante as duas etapas, como se segue: perda de casca durante a extração e secagem no campo (10.207 $kW.h.ha^{-1}$) e perda de casca durante o transporte de madeira, da beira do talhão (após a secagem) até o empilhamento na UPC que corresponde a 3.860 $kW.h.ha^{-1}$.

28.4 Conclusões

As simulações e modelagens matemáticas necessárias foram realizadas e subsidiaram o projeto do sistema piloto de cogeração. O segmento de transporte de gases foi testado, liberando o projeto do sistema definitivo. O sistema de processamento de resíduos de carvão e do processo florestal foi levantado e especificado. A turbina e queimador foram especificados, sendo a turbina EFTG foi importada e encontra-se disponível para montagem em Martinho Campos/MG.

No momento o projeto encontra-se na fase final de construção. A previsão é de que a parte construtiva seja finalizada até agosto de 2013 e tenha início dos testes no sistema de cogeração. Os testes do sistema deverão ser concluídos até novem-

bro/2013, quando finaliza o convênio do projeto. O atraso de execução ocorreu basicamente por atrasos na importação e no processo de contratação das obras do projeto, associadas com dificuldades de se encontrar fornecedores. Além disso, o projeto teve de ser paralisado durante 6 meses devido modificação societária da ArcelorMittal, resultando na modificação da empresa executora de ArcelorMittal Bioenergia para ArcelorMittal Bioflorestas.

Ao longo do projeto, até o momento foram realizados dois seminários (anual) de transferência tecnológica, e reuniões de apresentação de produto técnico, bem com reuniões de tomada de decisão sobre o projeto.

As expectativas para com o projeto permanecem intensas. Os resultados preliminares apontam para o sucesso da cogeração no setor de silvicultura e para novos negócios em energia, se constituindo em uma alternativa energética sustentável, com contribuição significativa em eficiência energética dos processos e em geração distribuída.

Capítulo 29

Capítulo 29: Potencial dos Resíduos da Colheita Florestal e Resíduos da Carbonização para a Produção de Energia[29]

***Resumo*- A utilização de gases residuais do processo de carbonização da madeira e resíduos florestais se apresentam como um interessante potencial energético a ser explorado. Este trabalho teve como objetivo determinar as propriedades químicas e físicas dos resíduos da colheita florestal e do processo de carbonização da madeira de modo a verificar a viabilidade do uso desse material para a geração de energia térmica e elétrica. Os resíduos da colheita florestal e da carbonização apresentaram potencial para serem utilizados para a geração de energia, uma vez que estocam uma grande quantidade de energia que não é utilizada. A quantidade de nutrientes exportada caso o resíduo da colheita seja retirado do campo para utilização na geração de energia é significativa, o que pode acarretar em custos com fertilização, e precisa ser devidamente avaliado, a fim de determinar o limite de utilização desses resíduos.**

29.1 Introdução

A utilização da biomassa para a geração de energia é um tema que tem apresentado muita relevância [1]-[3] principalmente por se tratar de um combustível renovável, perante às perspectivas de esgotamento das reservas mundiais de combustíveis fósseis e das pressões da sociedade por soluções ambientais para o problema das emissões de gases poluentes e das mudanças climáticas, como por suas características de produção descentralizada e próxima aos locais de demanda de carga, geradora de oportunidade de trabalho e renda no campo, dentre outros [1].

Dentre as fontes de biomassa utilizadas, a biomassa florestal apresenta grande destaque e pode ser diferenciada em três principais grupos: o material advindo da colheita florestal (ou resíduo da colheita), os resíduos gerados devido ao processamento da madeira e a madeira oriunda de florestas energéticas [4]. O resíduo da colheita florestal é formado por galhos, folhas, cascas e parte da madeira não aproveitada, como as ponteiras e o material restante do corte (cepas da floresta recém cortada) [4]-[6]. No caso da produção de carvão vegetal, os resíduos sólidos gerados durante a transformação da madeira são os atiços e os finos.

Atualmente, no Brasil, os resíduos da colheita florestal, nas empresas produtoras de carvão vegetal, são deixados no campo onde ocorre a ciclagem dos nutrientes. Essa prática vem sendo realizada principalmente porque ainda são incipientes os estudos a respeito do aproveitamento desse resíduo, que abordem a sua quantifica-

[29] CARNEIRO, A.C. O.; MENDES, A. F. N.; CASTRO, R. V. O.; SILVA, C.H.F.; CUNHA, W.L.P.; CANDIDO, W.L.. Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

ção, qualificação e a metodologia mais adequada para sua coleta. Além disso, a utilização de toda a biomassa produzida para a geração de energia pode acarretar em problemas de sustentabilidade de produção dos sítios, pois no caso da retirada dos resíduos da colheita, se a remoção de nutrientes for superior às entradas de nutrientes no talhão, o balanço nutricional do sistema solo-planta será negativo, reduzindo o potencial produtivo da área [7]. Dessa forma, os nutrientes exportados deverão ser repostos pela adição de adubos químicos ou orgânicos [8].

Entretanto, o aproveitamento dos resíduos florestais pode gerar benefícios à floresta e ao meio ambiente uma vez que favorece o crescimento da floresta; reduz os riscos de incêndios florestais e reduz os impactos ao meio ambiente na produção de energia [9]; além de redução nos custos de preparo de área para a próxima rotação quando se utiliza um sistema de colheita menos oneroso [10].

De modo geral, os resíduos lignocelulósicos são combustíveis e podem ser utilizados diretamente na condição em que se encontram ou podem ser transformados por processos mecânicos em partículas menores como cavacos ou serragem, ou ainda adensados na forma de briquetes e pellets [2].

Para o aproveitamento adequado dos resíduos florestais, quando utilizado sem processo de conversão previa para obtenção de combustível (sólido ou gasoso) com características mais homogêneas, é necessário o estudo de suas propriedades energéticas, analisando as variáveis como umidade, densidade, granulometria, poder calorífico e a densidade energética, devido à influência direta no custo do kWh produzido [3],[11].

Diante do que foi exposto verifica-se a necessidade de qualificação dos resíduos florestais para determinar a viabilidade de sua utilização como combustível para geração de energia, principalmente nos projetos de cogeração nas unidades produtoras de carvão vegetal. Portanto, esse estudo teve como objetivo determinar as propriedades químicas e físicas dos resíduos da colheita florestal e do processo de carbonização da madeira, bem como avaliar o feito da classe de diâmetro das árvores nas propriedades da madeira, casca, galhos e folhas, de modo a verificar a viabilidade do uso desse material para a geração de energia térmica e elétrica.

29.2 Desenvolvimento da Pesquisa

Neste contexto realizou-se de 2010-2014, o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) Cemig GT 358 (PD-4951-0358/2010), dentro do Programa de P&D ANEEL. Este projeto foi realizado em parceria com a ArcelorMittal Bioflorestas e com desenvolvimento técnico-científico em grande parte realizado pela Universidade Federal de Viçosa, com um investimento total na ordem de R$8,8 milhões.

O objetivo deste projeto – P&D Cemig GT foi desenvolver um sistema de cogeração, se constituindo em uma ação pioneira, que resolvesse os gargalos tecnológicos associados ao transporte e uso dos gases residuais da carbonização. A metodologia utilizada foi o desenvolvimento experimental juntamente com estudos de caso. Como produtos principais obteve-se o sistema de cogeração composto por:

sistema de transporte de gases residuais, sistema de aproveitamento energético de biomassa residual e sistema de produção de eletricidade usando uma turbina de queima externa (EFGT – *externally-fired gas-turbine*). A aplicabilidade deste projeto se encontra na definição das condições e parâmetros onde se torna factível e viável o aproveitamento energético, assim como no desenvolvimento de ações de fomento de pesquisa e desenvolvimento industrial local.

29.3 Metodologia

A metodologia de desenvolvimento do projeto é indicada a seguir:

- Avaliação do estado científico do problema junto com o desenvolvimento de modelagem matemática necessária;
- Projeto e Construção do sistema de transporte dos gases da carbonização, que inicialmente fez uso de um segmento de testes para definição construtiva;
- Avaliação de tecnologias de produção de energia, mapeamento de fornecedores e aquisição da turbina EFGT;
- Projeto e construção do sistema de cogeração;
- Inventário florestal e desenvolvimento de sistema de aproveitamento de biomassa florestal residual;
- Testes e ajustes integrais no sistema protótipo, juntamente com a elaboração de procedimentos operacionais e treinamentos de segurança;
- Análise técnica, econômica, ambiental e energética do sistema, revisão e consolidação de resultados do projeto.

A Figura 1 ilustra a implantação do protótipo experimental deste projeto. Os resultados descritos neste artigo estão limitados ao mapeamento do potencial energético nos resíduos florestais e também nos resíduos da produção de carvão (inventário florestal). Os resultados associados com o transporte de gases e da cogeração serão objeto de relato em outro artigo. Para maiores detalhes sobre a parte de projeto ver [12]-[13].

A. Local do experimento

O presente estudo foi desenvolvido na empresa Arcelor-Mittal BioFlorestas na cidade de Martinho Campos – MG (Figura 2). O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3ºC, e precipitação média anual de 1.400 mm [14].

Figura 1 – Esquema de desenvolvimento experimental e destaque para os resultados relatados neste artigo.

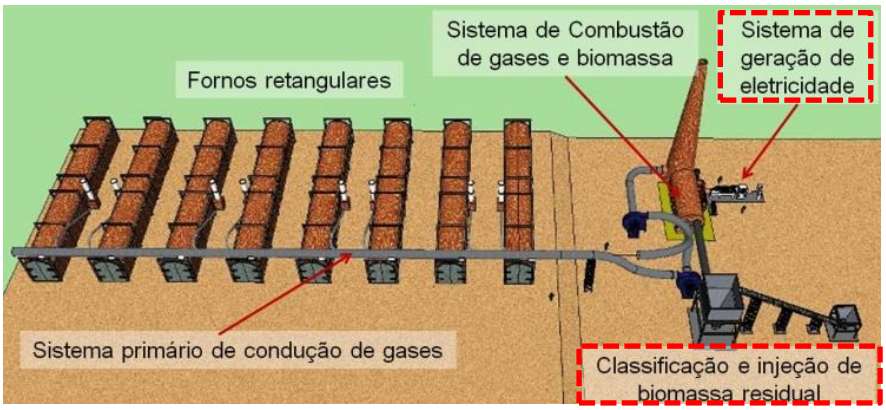
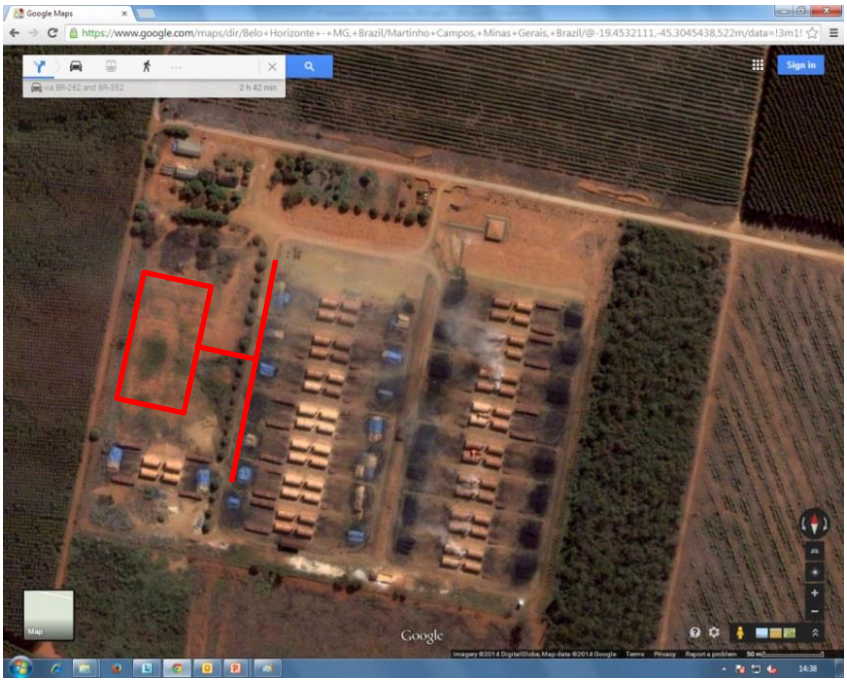


Figura 2 – UPB Buritis em Martinho Campos/MG. Em destaque a Unidade de Cogeração.



Inicialmente definiu-se uma área de produção de 50 hectares, correspondente ao material genético mais representativo da empresa (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), com espaçamento inicial de 3,0 x 2,5m, que se encontrava em idade de corte (6,7 anos) no período de execução do projeto. Demais informações referentes à área de estudo estão descritas na tabela I.

Tabela I – Informações cadastrais e de produtividade referentes à área.

Data de Plantio (dd/mm/aaaa)	20/09/2005
Data de Corte (dd/mm/aaaa)	15/06/2012
Idade (meses)	79
Declividade máxima da área	3% (plano)
Volume total com casca ($m^3\ ha^{-1}$)	283,18
Número de árvores (ha)	1235
Mortalidade	7%
$IMA_{6,7}$ ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$)	42,3

em que IMA é o incremento médio anual em volume com casca na idade de corte [15].

B. Obtenção do material de estudo

Para determinação das propriedades físicas e químicas da madeira, casca, galhos e folhas, foram utilizadas 15 árvores amostra, sendo três árvores em cada uma das cinco classes de diâmetro identificadas no povoamento. De cada árvore retirou-se as folhas, os galhos e a casca, que em seguida foram colocadas em lonas para pesagem logo após a colheita, de modo a evitar a perda de umidade.

Após pesar todo o material, foram coletadas amostras de folhas e de galhos, com aproximadamente 300 gramas. A amostra de folhas continha folhas verdes de diferentes tamanhos, a amostra de galhos, apenas os galhos com folhas com diferentes diâmetros, e a amostra de cascas coletada ao longo de cada árvore.

Da madeira foram obtidos cinco discos equidistantes, em diferentes posições no tronco, ou seja, 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial das árvores, além do disco na altura do dap (diâmetro à altura do peito), totalizando seis discos. Todos os discos também foram pesados logo após o processamento das árvores, para evitar a perda de umidade.

As amostras de cascas, galhos, folhas e os discos de madeira de cada uma das 15 árvores foram separadas em sacos plásticos, para serem enviadas para análises em laboratório.

C. Quantificação de carvão vegetal, atiços e finos

A madeira foi carbonizada em fornos retangulares de aproximadamente 150 m^3 ou 240 st, sendo realizadas três repetições (três carbonizações completas com o material rastreado).

Após o término da carbonização foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, atiços e finos. Foi realizada uma amostragem de cada um destes materiais, em cada um dos três fornos para posterior realização das análises físicas e químicas.

D. Qualificação da biomassa

Foram determinadas as propriedades físicas e químicas da madeira, casca, galhos, folhas, carvão vegetal, atiços e finos: poder calorífico superior (PCS); análise química imediata (cinzas, voláteis, carbono fixo); análise elementar e análise de minerais. Foram determinadas as densidades básicas da madeira e da casca, e a densidade relativa aparente do carvão e dos atiços. Além disso, foram determinadas as densidades à granel do carvão vegetal, atiços, finos, folhas, galhos e ponteira.

E. Densidade básica da madeira e da casca

De cada disco foram retiradas duas cunhas opostas passando pela medula, as quais foram identificadas e destinadas a determinação da densidade básica da madeira. Para a casca, utilizou-se uma amostra composta, retirando-se três amostras de casca ao longo de cada árvore amostra. Os procedimentos utilizados para determinação da densidade básica da madeira e da casca estão de acordo com o método de imersão em água, descrito por [16]. Os valores de densidade foram calculados a partir da média ponderada pelo diâmetro dos discos das respectivas cunhas para a madeira, e das três amostras para a casca.

F. Densidade relativa aparente do carvão e atiço

A densidade relativa aparente do carvão e do atiço foi determinada de acordo com o método proposto por [16], utilizando-se uma balança hidrostática para a determinação do volume deslocado em mercúrio.

G. Densidade a granel das folhas, dos galhos, da ponteira, do carvão vegetal, do atiço e dos finos

Para determinar a densidade à granel das folhas, dos galhos, das ponteiras, do carvão, do atiço e dos finos foi utilizada uma caixa de volume conhecido. Os recipientes foram preenchidos com as amostras analisadas e tampados, e em seguida procedeu-se a pesagem. A massa total obtida foi subtraída da massa da caixa e dessa forma obteve-se a massa das amostras, por m³ (1).

$$DG = {}^{M}/_{V} \quad (1)$$

em que:

DG = densidade à granel (kg.m-³);

M = massa de folhas, galhos, ponteira, carvão vegetal, atiço ou finos (kg);

V = volume conhecido do recipiente (m³).

H. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior da madeira, da casca, dos galhos, das folhas, do carvão vegetal, do atiço e dos finos foi determinados de acordo com a metodologia des-

crita pela norma da ABNT NBR 8633 [17], utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

I. Potencial energético

O potencial energético da madeira, da casca, dos galhos, das folhas, do carvão vegetal, do atiço e dos finos foi determinado multiplicando a biomassa pelo poder calor superior, conforme (2).

$$PE = Biomassa \times PCS \times 4{,}19002 \quad (2)$$

em que:

PE = potencial energético kJ;

Biomassa = biomassa de madeira, casca, galhos ou folhas (kg);

PCS = poder calorífico superior da madeira, casca, galhos ou folhas (kcal/kg).

J. Análise química imediata

Para a análise química imediata (determinação do teor de cinzas, voláteis e carbono fixo) da madeira, galho, casca, folha, carvão vegetal, atiço e finos foi utilizado um equipamento TGA 1000, da Navas Instrument. Para o teor de cinzas a taxa de aquecimento utilizada foi de 35°C.min^{-1}, em atmosfera de ar, e o procedimento foi encerrado quando as amostras atingiram massa constante, com variação abaixo de 0,04g. Para o teor de voláteis a taxa de aquecimento utilizada também foi de 35°C.min^{-1}, em atmosfera de ar, e o procedimento foi finalizado quando a temperatura atingiu 950°C. O teor de carbono fixo foi obtido por diferença, ou seja, somando-se os valores de teor de voláteis e cinzas, e subtrair de 100.

K. Análise elementar

A análise elementar da madeira, casca, galho, folha, carvão, finos e atiço foi realizada no Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA. Amostras compostas de cada material por árvore foram trituradas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em relação à massa seca da madeira foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), conforme realizado nos trabalhos de [18]-[19]. O analisador utiliza como gases de arraste e ignição o hélio e o oxigênio, respectivamente. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200°C. O teor de oxigênio foi obtido por diferença em relação aos demais componentes elementares.

L. Determinação do teor de minerais

A determinação do teor de minerais da madeira, cascas, galhos e folhas, foi realizada no Laboratório de Solos Florestais, da UFV. Para determinar as concentrações de macronutrientes (P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (Zn, Cu, Mn e Fe), utilizou-se a digestão nítrico-perclórica, com a adição de ácido nítrico e ácido per-

clórico na proporção 4:1. Posteriormente, para a determinação do fósforo e do enxofre foi utilizado um espectrofotômetro a 725nm. O potássio foi determinado pela emissão de luz no fotômetro de chama. Para o cálcio, magnésio e micronutrientes realizou-se a leitura da emissão de luz no espectrômetro de absorção atômica. Para a análise de nitrogênio (N) utilizou-se a digestão sulfúrica, e determinou a sua concentração pelo método Kejdhal. A concentração de boro (B) foi determinada pela calcinação e posteriormente leitura em espectrofotômetro a 420 nm.

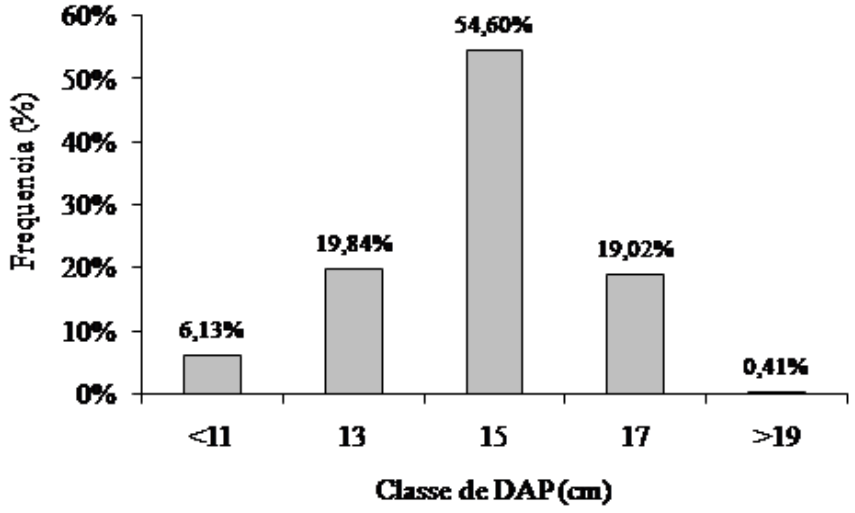
M. Análise estatística

Foi avaliado o efeito da classe de **dap** das árvores nas propriedades da madeira, casca, galhos e folhas. Inicialmente os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, procedeu-se a análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste Tukey. Para as variáveis que não atenderam as pressuposições de normalidade e/ou homogeneidade de variância foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Considerou-se sempre o nível de significância de 5%.

29.4 Resultados e Discussão

Na Figura 3 está apresentada a distribuição diamétrica das árvores do povoamento avaliado.

Figura 3 – Distribuição diamétrica (dap) das árvores do talhão (3,87cm).



Analisando a Figura 3 observa-se uma maior concentração de árvores na classe de 15 cm de dap, sendo que os dados foram caracterizados por uma distribuição normal, como é de se esperar para uma floresta equiânea. Observa-se que apenas

6,13% dos indivíduos apresentaram dap inferior a 11,0 cm, enquanto que somente 0,41% dos indivíduos apresentaram dap superior a 19,0 cm.

Observou-se que não houve diferença significativa entre as classes de diâmetro para a maior parte das análises realizadas, portanto, foram discutidos apenas os valores médios de cada propriedade avaliada. Isso sugere que é indicada uma amostragem de árvores no povoamento com diâmetro médio para a determinação das propriedades da madeira, como é normalmente realizado em pesquisas relacionadas à tecnologia da madeira.

Na tabela II estão apresentados os valores médios, ponderados por classe de diâmetro, obtidos para densidade, poder calorífico superior e análise química imediata da madeira, da casca, das folhas e dos galhos.

De maneira geral, as madeira de Eucalyptus sp., usadas para produção de carvão vegetal, apresentam densidade básica, classificada como densidade média, em torno de 0,54 g cm^{-3} [20]. Observa-se na tabela II que a densidade básica da madeira foi igual a 517,8 $kg.m^{-3}$, sendo esse valor inferior ao que normalmente se observa para produção de carvão vegetal. Verifica-se ainda que o maior valor para o poder calorífico superior foi obtido para as folhas (5082 $kcal.kg^{-1}$), uma vez que apresentou o maior teor de carbono fixo (18,83%) e menor teor de voláteis (76,86%), apesar de ter apresentado o maior teor de cinzas (4,31%).

Na tabela III estão apresentados os valores médios, ponderados pela classe de dap, da composição química elementar da madeira, casca, galhos e folhas.

Analisando a tabela III observa-se que a composição química elementar é bastante semelhante para as diferentes partes da árvore, com exceção das folhas que apresentaram maior valor de nitrogênio (N%), de enxofre (S%) e menor valor de oxigênio (O%).

Na tabela IV estão apresentados os valores médios, ponderados pela classe de diâmetro, bem como os valores estimados por quilo (kg) de material, por árvore e por hectare, do teor de minerais para a madeira, a casca, os galhos e as folhas. Observa-se na tabela IV que, de modo geral, as folhas apresentaram uma maior concentração de minerais por quilo (kg) de material, entretanto, quando se avalia a massa de nutrientes por hectare verifica-se que a madeira é o compartimento da árvore que estoca maior quantidade de nutrientes devido a sua maior fração de biomassa.

Tabela II – Valores médios, ponderados por classe de dap, observados para densidade, poder calorífico superior e análise química imediata da madeira, da casca, dos galhos e das folhas.

Componentes das árvores	Densidade ($kg.m^{-3}$)	PCS ($kcal.kg^{-1}$)	Análise Química Imediata		
			Voláteis	Cinzas	Carbono fixo
				(%)	
Madeira	517,8 (Básica)	4588	84,95	0,18	14,90
Casca	330,6 (Básica)	4400	81,23	2,65	16,12
Galho	- (A granel)	4688	81,11	2,25	16,64
Folha	- (A granel)	5082	76,86	4,31	18,83

Tabela III – Valores médios, ponderados pela classe de dap, da composição química elementar para madeira, casca, galhos e folhas.

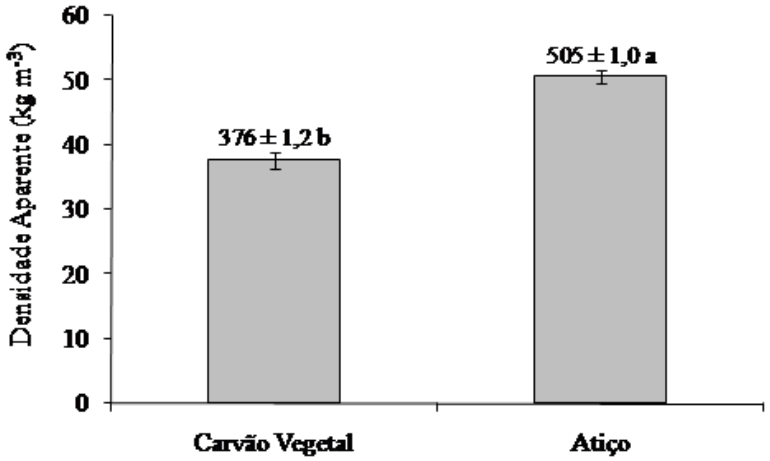
Coponentes da árvore	Composição Química Elementar (%)					
	Nitrogênio	Carbono	Hidrogênio	Enxofre	Oxigênio	Cinzas
	N	C	H	S	O	-
Madeira	1,44	46,43	5,94	0,04	45,92	0,18
Casca	1,39	43,60	5,60	0,04	46,72	2,65
Galho	1,54	46,57	5,80	0,05	43,80	2,25
Folha	2,79	49,20	5,90	0,11	37,70	4,31

Tabela IV – Valores médios dos teores de minerais da madeira, casca, galhos e folhas, estimados por kg de material, por árvore e por hectare.

Material	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu	B
	Massa de nutriente por kg de material										
	---------- (dag.kg^{-1}) ----------						---------- (mg.kg^{-1}) ----------				
Madeira	0,082	0,007	0,156	0,020	0,005	0,037	1,243	9,312	7,606	1,594	7,091
Casca	0,148	0,026	0,574	0,346	0,114	0,034	1,470	106,44	293,53	3,115	11,446
Galho	0,257	0,035	0,461	0,354	0,135	0,037	3,160	65,41	187,39	5,055	13,452
Folha	1,579	0,116	0,940	0,553	0,303	0,137	9,552	116,84	240,82	6,004	41,591
	Massa de nutriente por árvore										
	---------- (dag.árvore^{-1}) ----------						---------- (mg.árvore^{-1}) ----------				
Madeira	7,918	0,638	15,080	1,933	0,519	3,585	120,4	901,7	736,6	154,4	686,7
Casca	1,182	0,204	4,590	2,768	0,910	0,273	11,8	851,5	2348,2	24,9	91,6
Galho	0,626	0,087	1,121	0,860	0,329	0,090	7,7	158,9	455,4	12,3	32,7
Folha	3,032	0,222	1,804	1,061	0,581	0,263	18,3	224,3	462,4	11,5	79,9
	Massa de nutriente por hectare										
	---------- (kg.hectare^{-1}) ----------										
Madeira	105,86	8,53	201,61	25,84	6,94	47,93	0,16	1,21	0,98	0,21	0,92
Casca	15,79	2,72	61,33	36,99	12,15	3,64	0,19	13,78	38,00	0,40	1,48
Galho	8,37	1,16	14,99	11,50	4,40	1,21	0,41	8,47	24,26	0,65	1,74
Folha	40,59	2,97	24,15	14,20	7,78	3,52	1,24	15,13	31,18	0,78	5,38

Na Figura 4 estão apresentados os valores médios obtidos para a densidade relativa aparente do carvão vegetal e dos atiços.

Figura 4 – Densidade relativa aparente do carvão vegetal e do atiço, em kg.m^{-3}.

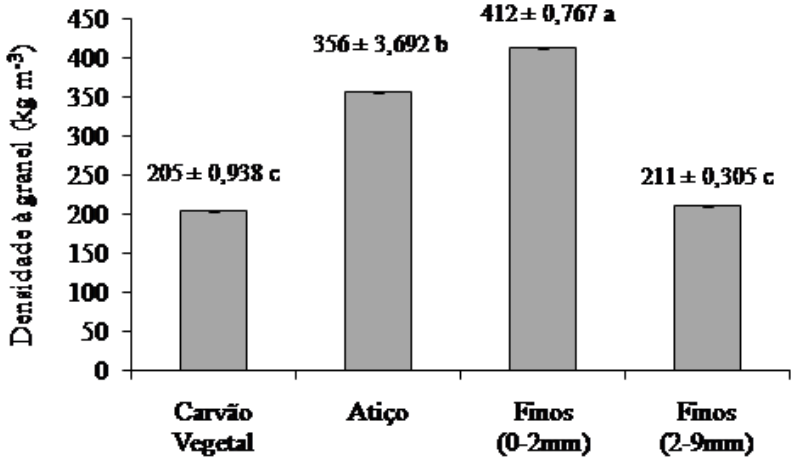


Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Tukey. As barras indicam o desvio padrão.

Verifica-se que a densidade aparente do atiço (505 kg.m^{-3}) foi maior do que a do carvão vegetal, sendo mais próxima ao valor obtido para densidade básica da madeira (517,8 kg.m^{-3}), devido ao fato de o atiço ser composto por madeira que não foi completamente carbonizada.

Na Figura 5 estão apresentados os valores médios obtidos para a densidade à granel do carvão vegetal, dos atiços e dos finos.

Figura 5 – Densidade à granel do carvão vegetal, atiço e finos (0-2 mm e 2–9 mm) em kg.m^{-3}.

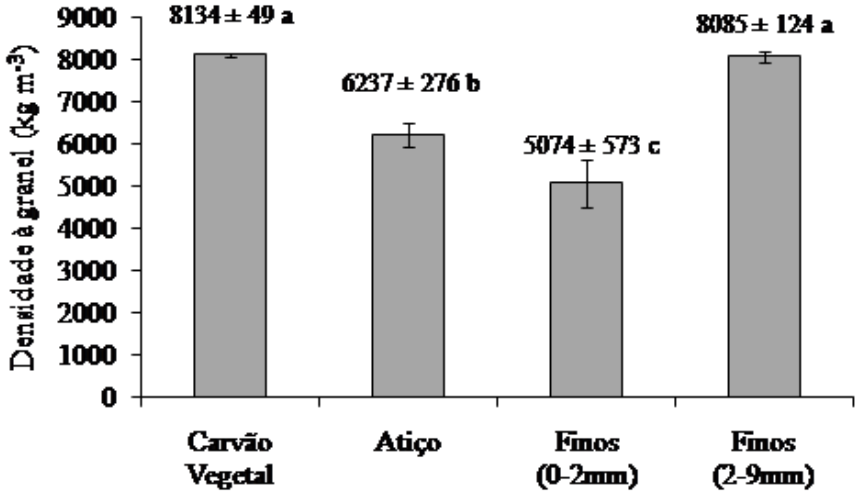


Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste *Kruskal-Wallis*. As barras indicam o desvio padrão.

A densidade à granel dos finos de menor granulometria (0-2 mm) foi maior devido ao fato de apresentar menos espaços vazios entre as partículas, portanto obteve-se mais massa por unidade de volume.

Na Figura 6 estão apresentados os valores médios do poder calorífico superior do carvão vegetal, dos atiços e dos finos. O maior valor do poder calorífico superior foi observado para o carvão vegetal, seguido pelos finos (2-9 mm), visto que estes apresentam a mesma composição do carvão, apenas com diferente granulometria. O menor valor do poder calorífico dos finos (0-2 mm) se deve a grande contaminação por terra devido ao contato com o piso do forno.

Figura 6 – Poder calorífico superior do carvão vegetal, atiço e finos de carvão.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Tukey. As barras indicam o desvio padrão.

Nas Figuras 7-13 estão apresentados os valores médios obtidos para a composição química do carvão vegetal, dos atiços e dos finos.

Figura 7 – Composição química: nitrogênio.

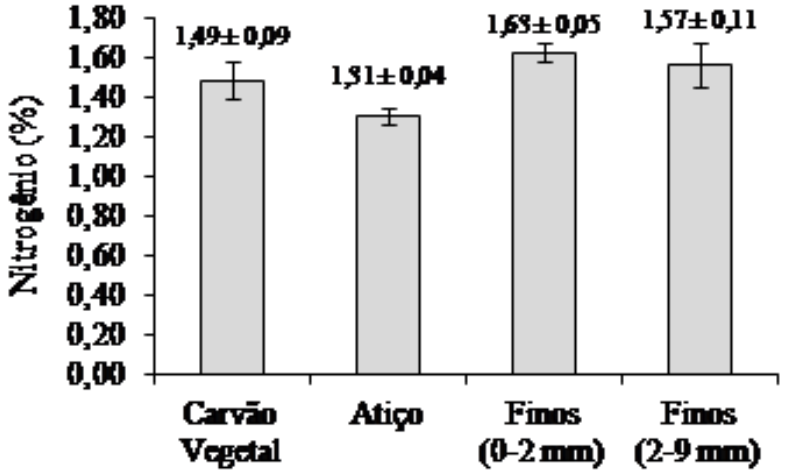


Figura 8 – Composição química: hidrogênio.

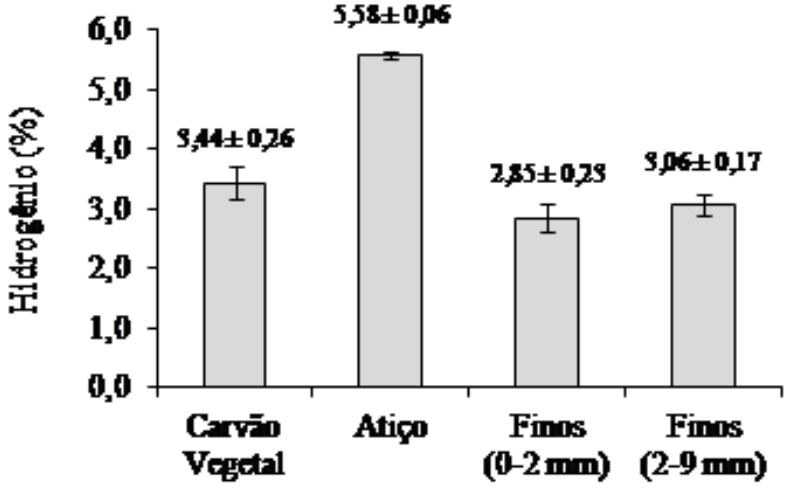


Figura 9 – Composição química: oxigênio.

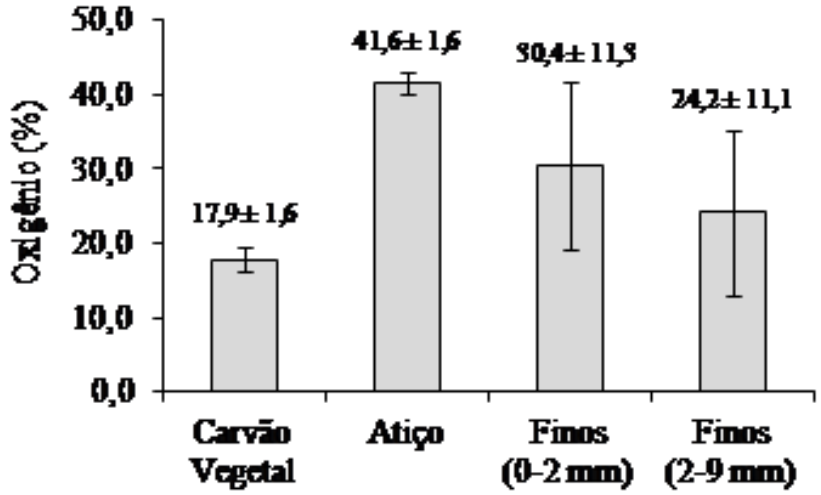


Figura 10 – Composição química: voláteis.

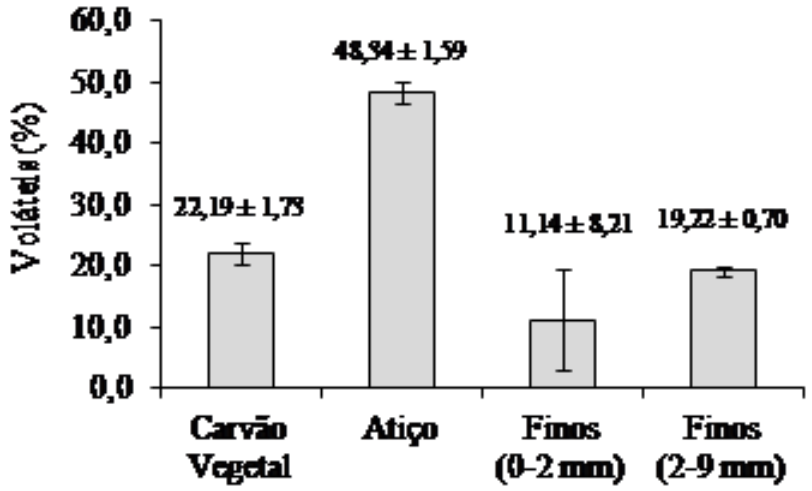


Figura 11 – Composição química: enxofre.

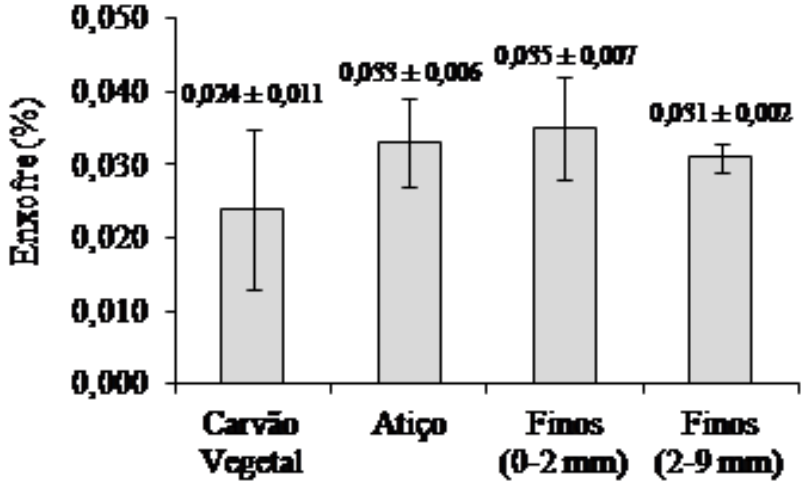


Figura 12 – Composição química: carbono fixo.

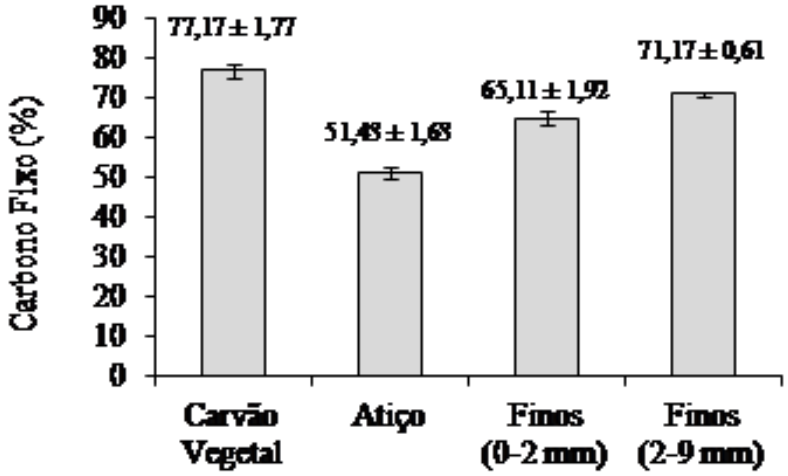
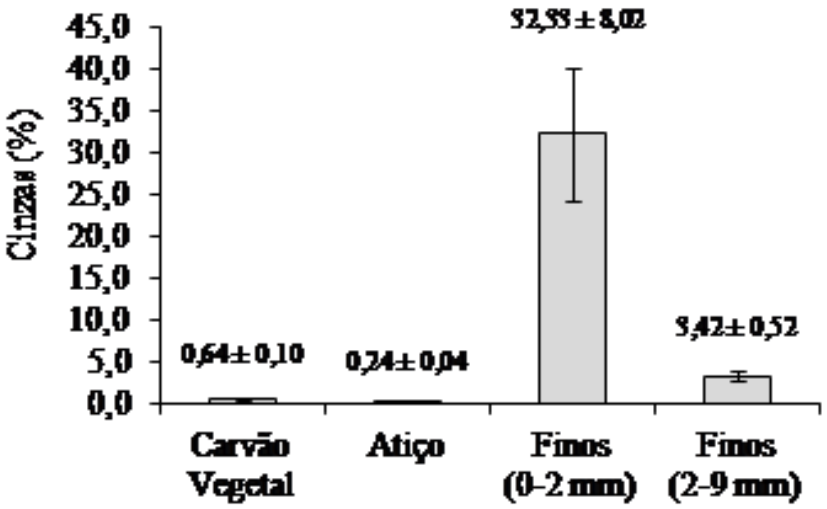


Figura 13 – Composição química: cinzas.



Observa-se que o teor de voláteis foi maior para os atiços, semelhante ao valor observado para a madeira, uma vez que os atiços são parte da madeira que não completaram o processo de carbonização. Com relação ao teor de cinzas, observa-se que os finos (0-2 mm) apresentaram um valor elevado para essa variável (34,48%), justificando o baixo poder calorífico superior. A presença desses inorgânicos nos finos de menor granulometria se deve à contaminação por terra, devido ao contato com o piso do forno.

O atiço apresentou os menores valores para nitrogênio (1,31%) e carbono (51,43%), e maiores teores de hidrogênio (5,58%) e oxigênio (17,9%), enquanto que o carvão vegetal apresentou os maiores valores para carbono (77,17%) e baixos valores de hidrogênio (3,44%), sendo esse resultado coerente uma vez que o processo de carbonização promove a degradação da madeira e ocorre a perda de hidrogênio através dos gases e concentração de carbono no carvão vegetal.

Na Figura 14 estão apresentados os valores para o potencial energético para a madeira, casca, galhos e folhas e na Figura 15 para o carvão vegetal, dos atiços e finos de carvão. A Tabela V resume o potencial de geração de energia elétrica por hectare em função das diferentes formas de biomassa.

Figura 14 – Potencial energético para a madeira, casca, galhos e folhas.

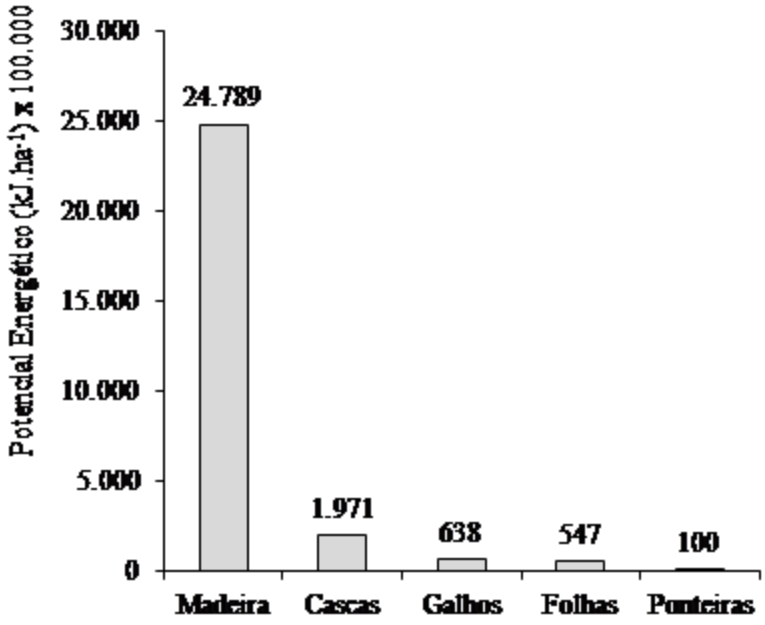


Figura 15 – Potencial energético para a madeira, casca, galhos e folhas.

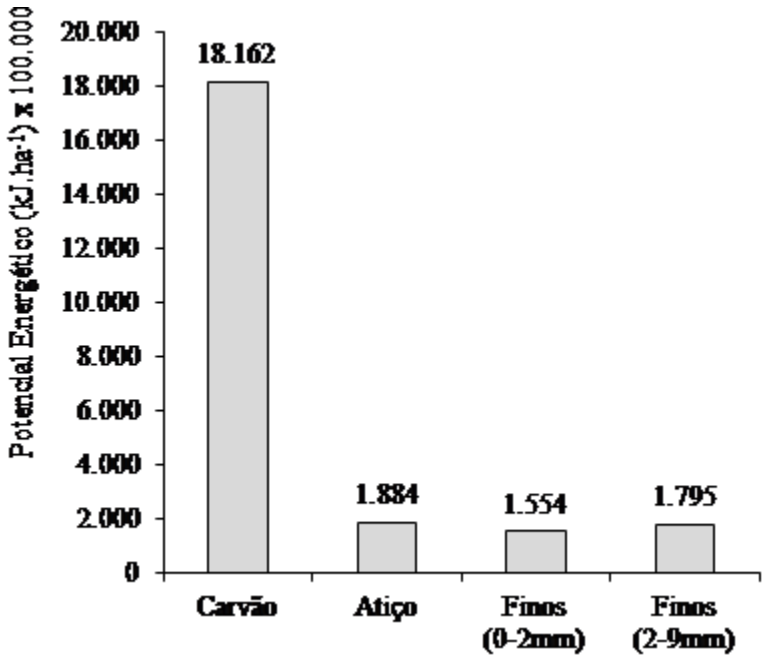


Tabela V – Resumo do potencial de geração de energia elétrica por hectare em função das diferentes biomassa.

Parâmetros	Madeira	Casca	Galho	Folha	Carvão	Atiços	Finos (0-2 mm)	Finos (2-9 mm)
PCS kcal/kg	4588,00	4406,0	4688,00	5082,00	8134,00	6237,00	5074,00	8085,00
Umidade %	30,00	18,00	50,00	60,00	4,00	8,00	5,00	5,00
PCI líquido kcal/kg	2804,80	3239,4	1882,00	1543,20	7473,60	5391,96	4482,50	7342,95
Resíduo ton/ha	128,95	10,69	3,25	2,57	53,29	7,21	7,31	5,30
Energia térmica kWh/ha	420556,93	40264,51	7112,21	4611,66	463102,49	45204,69	38101,25	45253,06
Energia elétrica kWh/ha (Ef. 17%)	71494,68	6844,97	1209,08	783,98	78727,42	7684,80	6477,21	7693,02
Potência elétrica MWh	71,49	6,84	1,21	0,78	78,73	7,68	6,48	7,69
Relação ton/ha/MW gerado	1,80	1,56	2,69	3,28	0,68	0,94	1,13	0,69

Conforme observado na Figura 3, a distribuição de diâmetros apresentou o comportamento esperado de distribuição diamétrica, com tendência a normalidade, sendo que a classe com maior frequência foi a de 15 cm.

O clone avaliado no presente estudo (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis) apresentou um valor de densidade básica de 510 $kg.m^{-3}$ (Tabela II). Esse resultado está de acordo com o que se observa na literatura para os materiais genéticos utilizados para a produção de carvão vegetal, que variam em torno de 520 $kg.m^{-3}$ a 560 $kg.m^{-3}$ [21]-[25]. Da mesma forma, o valor obtido para a densidade básica da casca (330 $kg.m^{-3}$) foi semelhante ao obtido por [26]-[27]; que variaram de 217 $kg.m^{-3}$ a 450 $kg.m^{-3}$ para espécies de Eucalyptus.

O valor médio do poder calorífico superior da madeira foi de 4588 $kcal.kg^{-1}$ (Tabela II), sendo que esse valor se encontra próximo ao observado por [28] que listaram o poder calorífico superior de diversas espécies de madeira e obtiveram um valor médio de 4732 $kcal.kg^{-1}$, sendo que os valores variaram de 3350 $kcal.kg^{-1}$ a 5260 $kcal.kg^{-1}$. No trabalho desenvolvido por [29], que avaliaram um povoamento de Eucalyptus saligna aos 102 meses obtiveram valores de poder calorífico superior para a madeira de 4288 $kcal.kg^{-1}$, para a casca de 3892 $kcal.kg^{-1}$ e para o resíduo de 4138 $kcal.kg^{-1}$. Verifica-se ainda que o maior valor para o poder calorífico superior foi obtido para as folhas (5082 $kcal.kg^{-1}$), uma vez que apresentou o maior teor de carbono fixo (18,83%) e menor teor de voláteis (76,86%), apesar de ter apresentado o maior teor de cinzas (4,31%).

Com relação à composição química imediata da madeira, da casca e dos resíduos da colheita, apresentada na tabela 2, verifica-se que, de modo geral, os valores obtidos nesse trabalho estão de acordo com o que se observa na literatura.

Quando se utiliza biomassa para energia, a composição elementar é uma propriedade do combustível muito importante e constitui a base para análise do processo de combustão. A determinação da composição elementar é importante, pois a concentração dos elementos pode influenciar o poder calorífico superior do combustível, sendo que o carbono e o hidrogênio contribuem positivamente para essa variável, enquanto que maiores teores de oxigênio fazem diminuí-la [2].

De maneira geral a composição elementar da madeira não varia muito, e os valores médios são: 50% de carbono; 6% de hidrogênio; 43% oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 1% de cinzas [30]. Analisando a tabela 3 verifica-se que os valores obtidos para a composição química elementar da madeira são semelhantes aos apresentados por [30].

As folhas apresentaram maior quantidade de nutrientes por quilo (kg) de material, entretanto quando se avalia a massa de nutrientes por hectare, verifica-se que a madeira aloca a maior quantidade dos nutrientes, uma vez que é responsável por 88,33% da biomassa total (Tabela IV).

Com relação à alocação de cada nutriente nos diversos compartimentos das árvores, verificou-se no presente trabalho que a madeira apresentou maior quantidade

de nitrogênio, fósforo, enxofre e potássio (62,05%, 55,46%, 66,74%, 85,13%, respectivamente), a casca apresentou maior quantidade de cálcio (41,78%) e a copa apresentou maior teor de magnésio (38,95%). Resultado semelhante foi observado por [31] que verificaram para madeira de Eucalyptus saligna aos 7 anos de idade, que as folhas apresentaram a maior concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, e enxofre e na casca, por outro lado, foram encontradas as maiores concentrações de cálcio e magnésio.

A determinação da composição mineral da madeira e dos resíduos é muito importante quando se pretende utilizar toda a biomassa produzida, pois dessa maneira é possível determinar a exportação de nutrientes e os níveis sustentáveis da utilização dos resíduos.

De maneira geral, o eucalipto produz serapilheira relativamente pobre em nutrientes, em razão de sua eficiente ciclagem bioquímica, contribuindo, assim, pouco para a reposição de nutrientes ao solo [32]. A questão da manutenção da produtividade de plantações de eucalipto em regime de curtas rotações está relacionada com a espécie e com as práticas de manejo aplicadas e com a densidade de plantio [32], portanto é necessário avaliação para cada caso.

Além disso, a composição mineral da biomassa pode influenciar na sua utilização como matéria prima, ou seja, alguns minerais podem afetar negativamente a produção de alguns materiais, gerando defeitos no produto. Na produção do ferro gusa, altos teores de cinzas, bem como os sais que estão presentes na sua composição, podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferro-ligas e metais não ferrosos, podendo provocar defeitos. Os diversos tipos de aço produzidos apresentam uma grande variedade de elementos deletérios em sua composição, sendo que o fósforo é uma das principais impurezas contidas influenciando fortemente sua qualidade, alterando as características específicas desejadas para esses produtos [33].

Outro problema que pode ser provocado devido à presença de minerais é o encrustamento de cinzas e a corrosão em equipamentos e tubulações, que pode diminuir muito a vida útil do equipamento em questão.

Para uso siderúrgico é importante que o carvão apresente as propriedades dentro de um determinado padrão para melhorar a produtividade no alto-forno, e para a densidade relativa aparente o ideal é que o carvão apresente valores superiores a 250 $kg.m^{-3}$ [34]. Analisando a Figura 5 observa-se que o resultado encontrado para de densidade relativa aparente (376 $kg.m^{-3}$) do carvão estão de acordo com a literatura.

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi o que apresentou maior valor (8134 $kcal.kg^{-1}$), enquanto que os finos (0-2 mm) apresentaram o menor valor para essa propriedade, devido possivelmente a uma contaminação com impurezas presentes no chão do forno (Figura 6).

De acordo com [34] o carvão vegetal para uso siderúrgico deve apresentar teor de carbono fixo entre 70% e 80% e teor de materiais voláteis variando de 25% a 35%.

A reação de carbonização da madeira consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com consequente aumento do conteúdo energético do produto [2], [23]. Na madeira, os teores de carbono e oxigênio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%, e depois da carbonização, esses teores passam, em média, no carvão vegetal para 82% e 13,7%. Sendo assim, o carvão retém aproximadamente 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados [23].

Observa-se nas Figuras 7-13 que os valores para análise elementar estão de acordo com o apresentado por [23] e dos resultados apresentados por [35], que verificaram para carvão comercial vendidos em três municípios do Espírito Santo, um valor médio de carbono de 82,32%, 2,92% de hidrogênio e 14,33% de oxigênio.

Analisando as Figuras 14-15 observa-se que a madeira apresentou o maior potencial energético, que se deve a maior quantidade de biomassa que produzida por esse componente da árvore. Porém, quando comparamos com o carvão vegetal, observamos que este apresenta elevado potencial para geração de energia, devido ao poder calorífico mais elevado. Ou seja, durante a carbonização ocorre a concentração de carbono e consequentemente, de energia. Dessa maneira, verifica-se que os resíduos da carbonização também apresentam expressivo potencial energético, maior do que os resíduos da colheita florestal. Do ponto de vista do setor elétrico, verifica-se na Tabela V que o potencial total da biomassa para geração de energia elétrica, utilizando uma conversão elétrica média de 17%, está em torno de 12,76 MW/hectare. E a conversão de biomassa em energia é variável de acordo com cada tipo, tendo para madeira, por exemplo, uma relação de 1,8 ton de madeira/MW gerado.

29.5 Protótipo de Cogeração e Aproveitamento de Biomassa Residual

Para aproveitamento de biomassa residual, foi construído um sistema com picador, peneiramento, silos, sistema transportador e queimador auxiliar acoplado ao queimador principal, além da definição logística de coleta e transporte do resíduo florestal até o sistema de cogeração (Figuras 16-17).

Figura 16 – Sistema de aproveitamento de biomassa residual: esquema.

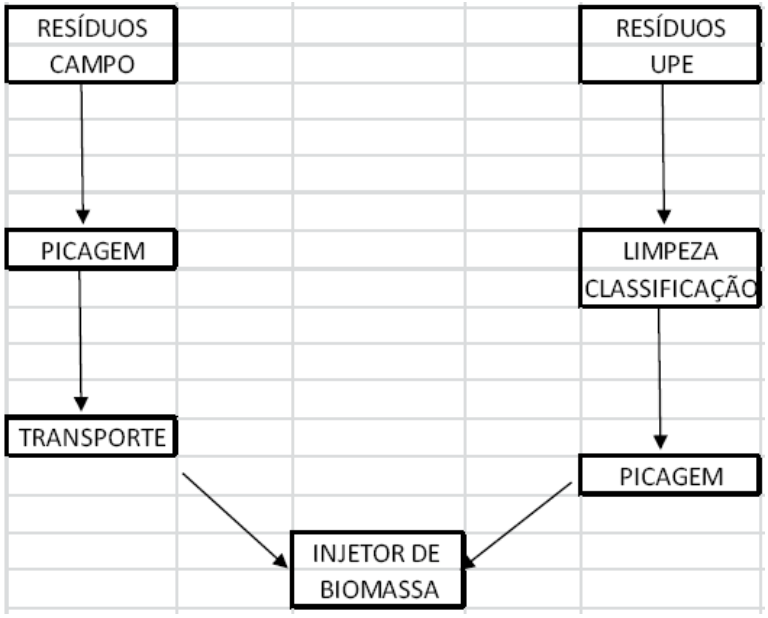


Figura 17 – Sistema de aproveitamento de biomassa residual: protótipo.

Nas Figuras 18 e 19 é indicado o sistema de cogeração e na Figura 20 o protótipo completo contendo: transporte de gases, aproveitamento de biomassa residual e cogeração usando uma turbina de queima externa (EFGT).

A escolha da tecnologia EFGT se deu pelos seguintes fatores: não consumir água no processo, realizar a queima dos gases gerados na carbonização da madeira em fornos de alvenaria, sua originalidade e o desenvolvimento regional e industrial. Inicialmente foram mapeados os potenciais fornecedores, sendo eles: Btola, Talbotts, Turbec e Genera, sendo constatado após negociação e visita técnica que a melhor opção para aquele momento seria da empresa italiana Genera, que forneceu apoio e troca de informações no sentido de viabilizar os resultados da pesquisa. O sistema EFGT instalado possui uma baixa capacidade (100 kW), mas o protótipo possui uma capacidade térmica na câmara de combustão da ordem de 50 kW, uma vez que a finalidade essencial da pesquisa era demonstrar as condições e o arranjo funcional para o sistema e subsidiar com parâmetros e informações para estudos de *scale up*.

Figura 18 – Esquema de funcionamento da turbina de queima externa.

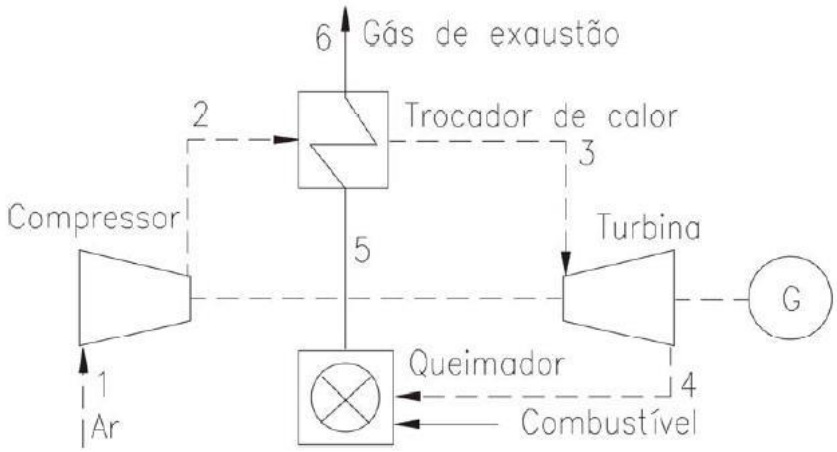


Figura 19 – Sistema de cogeração usando EFGT montado.

Figura 20 – Sistema de Cogeração em escala piloto do Projeto de P&D Aneel Cemig nº GT 358: transporte de gases, aproveitamento residual e turbina EFGT.

29.6 Benefícios e Dificuldades

Ao final do projeto foi construído um protótipo funcional de cogeração usando gases residuais da carbonização e feita uma pesquisa que aprofunda os conhecimentos podendo orientar e direcionar ações quanto a viabilidade do aproveitamento de resíduos. Este artigo apresentou o levantamento de estoque de energia disponível

na biomassa que pode ser utilizado para estimar a disponibilidade energéticas dos resíduos e neste sentido torna-se aplicável a sociedade em geral.

A concessionária se beneficiou pelo acesso a conhecimento e informações que lhe capacitam a direcionar esforços de pesquisa e ações empresariais em torno do tema energia da biomassa, além da possibilidade de novos desenvolvimentos decorrentes de novas pesquisas. As possibilidades de negócios futuros são: decisão por empreender, associar-se em um empreendimento, comercializar a energia de tais empreendimentos ou atuar, usando o programa de eficiência energética em empresas produtoras de carvão vegetal, além da possibilidade de *royalties* decorrente de patentes, que já se encontram em elaboração.

Já o setor de produção de carvão possui a possibilidade de diversificar as suas atividades tornando-as mais rentáveis e por consequência, mais competitivas. Outro benefício, que atinge além das empresas parcerias deste projeto, chegando até a sociedade é a minimização de efeitos ambientas decorrentes da emissão destes gases tornando a cadeia de aço mais sustentável.

Além disso, a Universidade Federal de Viçosa pode pesquisar um tema afim e de seu interesse, formando um mestre e um doutor além da perspectiva de publicações, que se encontra em elaboração e submissão para revistas indexadas. Tais publicações estão sendo efetivadas após o projeto e desta forma utilizará os dados consolidados.

Sob o enfoque do mapeamento de potencial residual, ocorreu como esperado do ponto de vista científico, sendo as dificuldades inerentes a esse desenvolvimento e a necessidade de infraestrutura analítica e laboratorial.

Ao longo do projeto aconteceram diversas reuniões e visitas técnicas de acompanhamento, sendo que o encerramento foi feito em um *Workshop* na sede da Cemig, havendo a participação de 50 pesquisadores em um evento aberto ao público em geral. As apresentações encontram-se na área de Inovação/Alternativas Energéticas no site da Cemig, e estão disponíveis para *download*.

29.7 Conclusões

A madeira de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis aos 79 meses, avaliada no presente trabalho, apresenta qualidade para a produção de carvão vegetal.

Os resíduos da colheita florestal e da carbonização apresentaram potencial para serem utilizados para a geração de energia, uma vez que estocam uma grande quantidade de energia que não é utilizada. Entretanto, os finos de menor granulometria (0-2mm) apresentam-se contaminados, o que dificulta o seu aproveitamento.

A quantidade de nutrientes exportada caso o resíduo da colheita seja retirado do campo para utilização na geração de energia é significativa, o que pode acarretar em custos com fertilização, e precisa ser devidamente avaliado, a fim de determinar o limite de utilização desses resíduos.

O projeto explicitou toda a complexidade envolvida no desenvolvimento deste tipo de cogeração, e se caracteriza em um grande sucesso pela sua implantação e conclusão, se constituindo também em um marco para os setores envolvidos nesta pesquisa. Entretanto, além de demostrar e resolver questões técnicas, o projeto também, naturalmente como uma pesquisa, levanta outras frentes de trabalho, como por exemplo: desenvolver um novo modelo de válvulas que isolam a passagem de ar quando o forno está em resfriamento e um novo dimensionamento das chapas das tubulações de transporte de gases e maior número de ancoragem; avaliar a substituição de tubulações aéreas por subterrâneas e estudar a viabilidade econômica deste novo modelo com conjunto de cogeração acima de 1 MW.

Os resultados apontam para a concretização da cogeração no setor de silvicultura e para novos negócios em energia, se constituindo em uma alternativa energética sustentável, com contribuição significativa em eficiência energética dos processos e em geração distribuída.

Espera-se que os resultados deste projeto possa contribuir para a discussão científica, o desenvolvimento industrial nacional e para o exercício de viabilidade econômico-financeiro das diversas empresas que possuam esse potencial de energia de resíduos, de forma a contribuir para uma matriz energética futura renovável e sustentável.

Capítulo 30

Capítulo 30: Desempenho de um Sistema Industrial de Transporte de Gases da Carbonização para a Cogeração de Energia Elétrica[30]

***Resumo*- O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destacando-se como maior produtor e consumidor de carvão vegetal. Aliado a isso, as indústrias independentes ou integradas de produção de ferro-gusa e ferro-ligas estão aumentando a eficiência do processo de carbonização da madeira com a finalidade de aprimorar a sustentabilidade ambiental, econômica e social da produção de carvão vegetal e siderúrgica. Dentro deste contexto de sustentabilidade destaque-se o uso de queimadores de gases acoplados aos fornos para queima dos gases da carbonização e consequente redução das emissões nocivas ao meio ambiente e ao homem, além da possibilidade da obtenção de energia térmica e elétrica. Os resultados deste projeto contribuem para viabilizar a cogeração usando gases residuais da carbonização.**

30.1 Introdução

A lenha, no passado, se constituiu na principal fonte de suprimento energético, sendo posteriormente substituída por combustíveis fósseis. Essa substituição, ao longo de mais de dois séculos, produziu reflexos ambientais, representados pela emissão de gases de efeito estufa. Além disso, com o aumento populacional e a construção de uma sociedade baseada no uso da energia, é inevitável a constatação da condição finita dos recursos naturais.

Com isto o carvão vegetal se consolida no mercado como uma fonte de maior facilidade em obtenção e além de ser uma fonte renovável de energia. O consumo do carvão vegetal está basicamente concentrado no mercado interno, com destaque para o Estado de Minas, que tem como principais destinos os setores de ferro gusa e aço, que consomem 83,45% do carvão vegetal produzido, e de ferro liga, que utiliza 14,83%, seguido do residencial (cocção e aquecimento residencial), do industrial (excluindo-se a siderurgia), com destaque para a produção de cimentos, indústria química, de alimentos e de cerâmicas [1].

Neste contexto de sustentabilidade destaque-se o uso de queimadores de gases acoplados aos fornos para queima dos gases do processo de carbonização e consequente redução das emissões nocivas ao meio ambiente e ao homem, além de possibilitar a obtenção de energia térmica e elétrica.

[30] CARNEIRO, A. C. O.; DONATO, D. B.; BARCELOS, D. C.; VALÊNCIA, A.R.; SILVA, C.H.F.; CUNHA, W.L.P. Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

No entanto, existem barreiras tecnológicas ligadas à qualidade dos gases, que não se apresenta homogênea em toda a fase da carbonização, além do seu baixo poder calorifico. As barreiras se amplificam, ainda mais, quando se propõe o uso do calor gerado, seja para a secagem da madeira seja para geração de energia elétrica, dentre as quais destaca-se o transporte dos gases da carbonização até a fornalha para queima dos mesmos, pois grande parte dos gases da carbonização são condensáveis a temperaturas inferiores a 150°C.

Logo, à medida que aumenta a distância entre os fornos e a fornalha, tem-se uma redução da temperatura dos gases da carbonização fazendo com que ocorra a condensação dos mesmos nas tubulações utilizadas para o seu transporte. Isso ocasiona incrustações, entupimentos e perda de energia para o queimador, visto que está presente nestes condensáveis o alcatrão, composto químico de alto poder calorifico. Além deste, ocorre também a condensação da água ácida no sistema reduzindo a vida útil do sistema.

Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo principal avaliar o desempenho e a eficiência de um sistema de transporte de gases da carbonização até a câmara de combustão de uma fornalha visando a utilização do calor gerado para projetos de cogeração. E como específico avaliar a eficiência da instalação de camisa de gases quentes nos dutos de transferência de gases dos fornos objetivando que as temperaturas das superfícies em contato com os gases de carbonização sejam sempre maiores que a do próprio fluxo. Com isso, pretende-se evitar o resfriamento dos gases, inclusive aquecendo-os, e desta forma, condicionar a transferência dos gases.

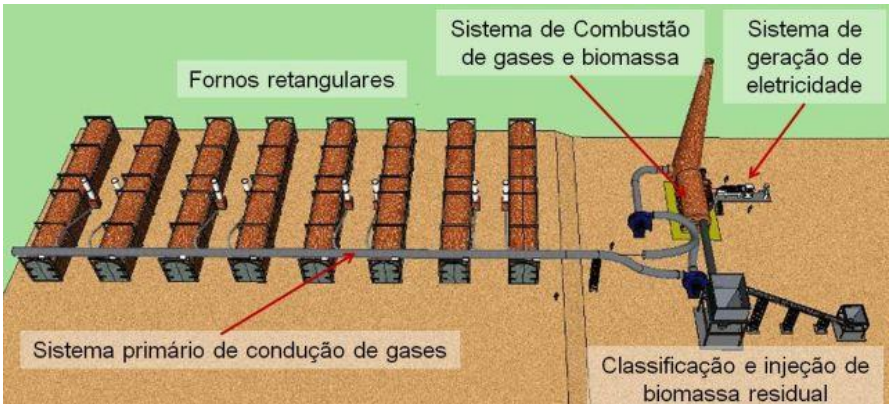
30.2 Desenvolvimento da Pesquisa

O Projeto de P&D GT0358 (PD-4951-0358/2010) foi resultado da parceria entre a CEMIG GT (proponente) e a ArcelorMittal Bioflorestas (executora) sendo realizado um investimento total de R$ 8.429562,40, considerando-se uma contrapartida da executora de aproximadamente R$ 1,6 Milhões.

O experimento foi conduzido na Unidade de Produção de Energia (UPE) da empresa ARCELORMITTAL Bioflorestas, unidade Buritis, localizada no Munícipio de Martinho Campos-MG.

Utilizou-se 12 fornos retangulares de alvenaria, com capacidade volumétrica interna de 240 m³ de madeira, vazão mássica média de gases de pirólise de cada forno de 32.000 kg/h e com rendimento gravimétrico em carvão vegetal médio de 35% (base seca). Cada ciclo de carbonização teve em média 12 dias, sendo que 4 destes dias destinados ao processo de carbonização e 8 dias ao resfriamento dos fornos. Uma visão geral do sistema pode ser observada na Figura 1. Cabe destacar que os resultados consolidados do projeto para o sistema de biomassa residual serão apresentados em outro artigo. Para maiores detalhes ver [2].

Figura 1 – Visão geral dos fornos e da linha de transporte dos gases.



30.3 Metodologia do Projeto

A. Descrição do sistema de transporte de gases

O sistema de transporte de gases experimental do projeto foi construído e testado, sendo composto por tubulações de aço carbono e diâmetro de 530 mm que coletam gases da carbonização de doze fornos e os conduzem até o queimador. Consiste na retirada destes gases da chaminé (Figura 2), os quais passam por tubulações (Figuras 3 e 4) até atingirem o queimador (Figura 5).

Para evitar a condensação do alcatrão nas tubulações, construiu-se um sistema que circunda e aquece a tubulação que conduz os gases da carbonização. Este sistema é composto de uma tubulação externa, de diâmetro 880 mm, onde passam os gases oriundos da combustão na chaminé, localizada após o queimador de gases da carbonização (Figura 6). Estes gases foram denominados gás de traço e são conduzidos no sentido oposto aos gases da carbonização, até atingir as extremidades do sistema de transporte de gases (Figura 7). A condução dos gases foi realizada por exautores. A parede externa da "camisa" da tubulação que transportou o gás de traço foi revestida externamente com lã de rocha de espessura de 3 polegadas, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 2 – Retirada dos gases da chaminé.

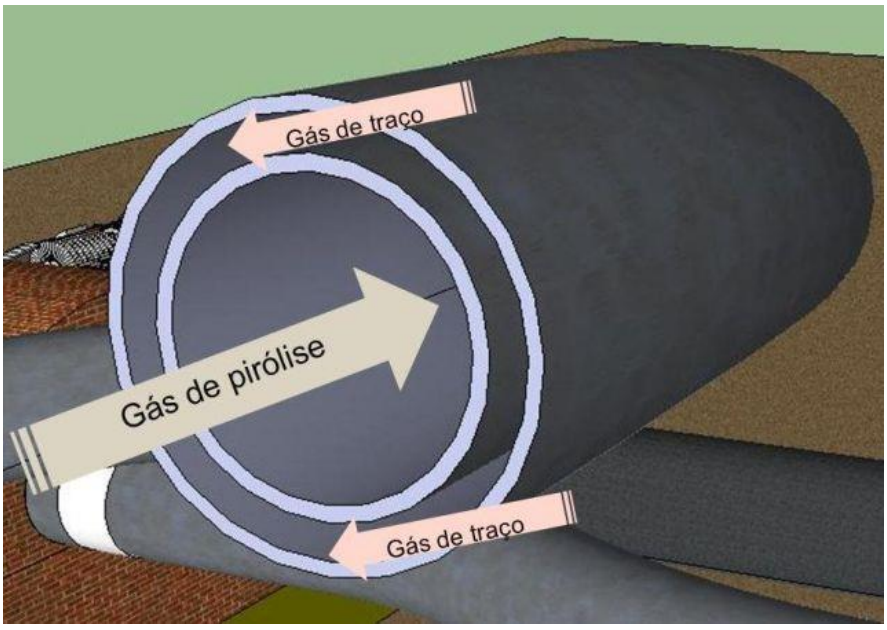
Figura 3 – Tubulações de transporte de gases.

Figura 4 – Tubulação de transporte de gases.

Figura 6 – Saída da tubulação de gás de traço do queimador central.

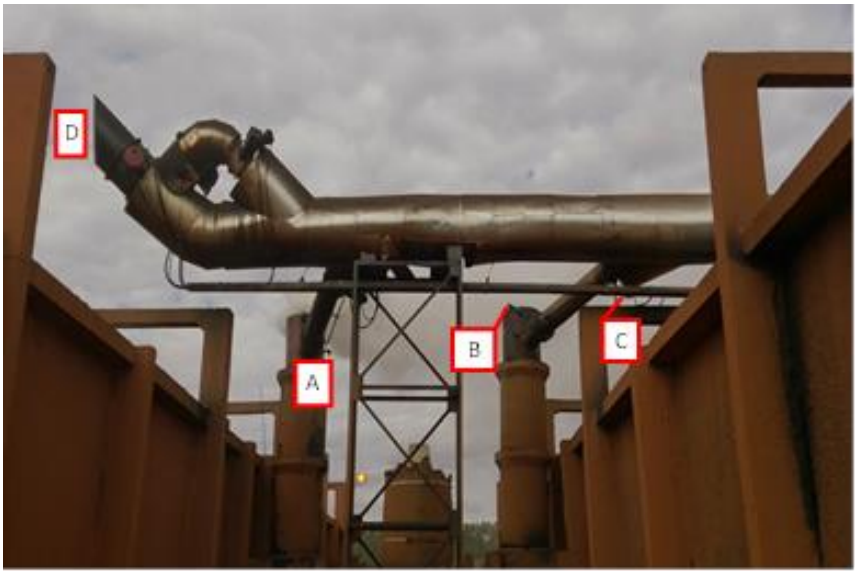
Figura 7 – Saída da tubulação de gás de traço do queimador central.

Figura 8 – Esquema ilustrando o gás de traço para evitar a condensação na tubulação.



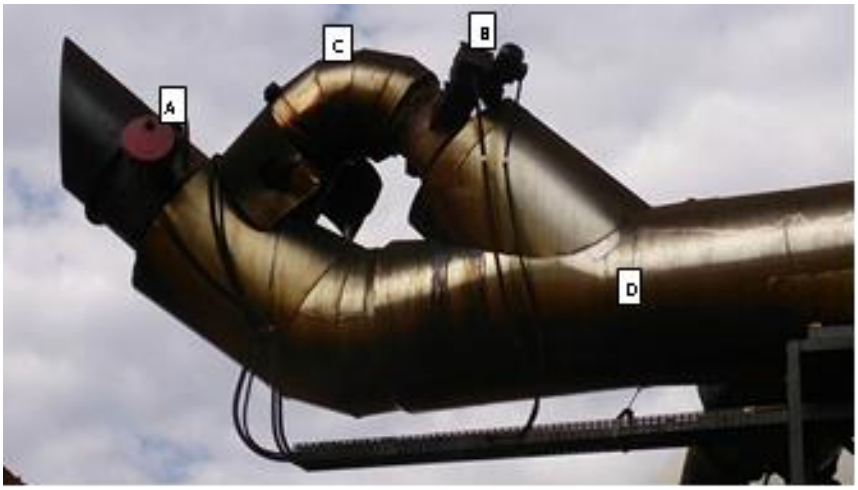
A exaustão dos gases da carbonização é realizada na porção superior da chaminé de cada forno (Figura 9, ponto A). Para efetuar o controle de vazão dos gases da carbonização foi instalado um sistema de válvulas, tipo borboleta, que fecham parcialmente a tubulação com apenas ¼ de volta. No topo de cada chaminé existe uma válvula de controle manual que quando fechada parcialmente permite que os gases da carbonização sejam desviados da chaminé para a tubulação de coleta (Figura 9 ponto B). Há também uma segunda válvula controlada por computador que permite a passagem dos gases da carbonização de cada chaminé até a tubulação principal (Figura 9 ponto C). O gás de traço pode ser liberado nas extremidades da tubulação (Figura 9 ponto D) ou retornar (Figura 10 ponto C), onde pode ser misturado aos gases da carbonização, fazendo com que a temperatura destes últimos se eleve e reduza a condensação e geração de alcatrão.

Figura 9 – Tubulações e válvulas que compõe o sistema de transporte de gases.



O retorno do gás de traço é feito por meio do fechamento da válvula instalada ao final da tubulação (Figura 10 ponto A) e pela abertura da válvula mostrada na Figura 10 ponto B. Todas as tubulações estão envolvidas por um sistema isolante de manta cerâmica, que reduz as perdas térmicas e otimiza o funcionamento do sistema de transporte de gases (Figura 10 ponto D).

Figura 10 – Detalhes de uma das extremidades do sistema de transporte de gases.



O sistema de captação de gases da carbonização para a cogeração de energia foi dividido em três “Trechos”. O “Trecho 1” corresponde aos fornos do número 1 a

6, que estão cerca de 82 m até a junção dos dutos que levam os gases para o queimador, O "Trecho 2" corresponde aos fornos de número 7 a 12, que se encontram a 82,4 m da junção do duto que leva ao queimador.

O "Trecho 3" é correspondente a junção dos dutos dos fornos até o queimador que apresenta uma extensão de 83,4 m. Portanto, o forno mais distante se encontra a 166,2 m do queimador.

A rede de dutos de transporte dos gases foi concebida de modo a formar uma bifurcação, tendo seis fornos acoplados a direita ("Trecho 1") e seis a esquerda ("Trecho 2"), e cada dois fornos se juntaram e direcionaram os gases para esse duto secundário e depois direcionam para um único duto central ("Trecho 3"), que os conduziram até a câmara de combustão do queimador de gases .

B. Transporte dos gases de pirólise até o queimador

Para realizar o transporte dos gases da carbonização da madeira, utilizou um ventilador que possui velocidade de tiragem de 34,2 m/s, que faz a sucção dos gases e os insufla para dentro da câmara de combustão do queimador com uma potência de 29 CV. Esse ventilador foi controlado por um inversor de frequência, de modo, a manter constante a pressão de sucção no duto coletor principal, permitindo a tiragem de gases de carbonização ao longo de toda a sua extensão.

Na saída da chaminé dos fornos instalou-se um *damper* que se fecha quando se desejar que seja feita a coleta de gases para o duto principal e ao mesmo tempo se abre uma válvula guilhotina localizada no início do duto de interligação, permitindo assim a coleta. Desta forma, podem ser selecionadas quais fases ao longo do processo de carbonização se destinarão aos queimadores de gases.

Instalou-se, também, uma válvula guilhotina para controle adicional do grau de abertura em função da pressão a montante dela e com isso, a depressão de tiragem do forno de carbonização poderá ser estabelecida e mantida. O controle de abertura e fechamento das válvulas e realizado manualmente.

C. Transporte gás de traço de pirólise até o queimador

Na saída da chaminé do queimador de gases, a 3,2 m de altura, iniciou-se a tiragem do gás de traço através da tubulação metálica já especificada.

Esse percorreu, em contracorrente, toda a extensão da rede de transporte de gases da carbonização, ou seja, do queimador até a chaminé dos fornos, de forma a evitar a condensação dos gases, além de manter aquecidos os gases da carbonização para melhor desempenho dentro do queimador.

Nas extremidades de início dos dutos coletores de gases de pirólise foram instaladas chaminés que lançaram os gases de traço para atmosfera (Figura 10 ponto A).

O exaustor de gás de traço trabalha a uma velocidade de 18,0 m/s e apresenta uma potência de 25,6 CV, tendo tanto uma potência quanto uma velocidade inferior ao exaustor dos gases da carbonização.

D. Avaliação de desempenho do sistema de transporte de gases.

Para avaliar o desempenho de funcionamento e eficiência do sistema de transporte de gases de pirólise para serem utilizados em sistemas de cogeração determinaram-se os seguintes parâmetros apresentados na tabela I.

Tabela I – Descrição do Gás e relação do local de amostragem.

Gás	Local de amostragem
Gás de carbonização	Chaminé do Forno 1
	Chaminé do Forno 2
	Média da temperatura na saída das chaminés
	Trecho 1
	Trecho 2
	Trecho 3
	Média de temperatura nos trechos
Gás combustão - Chaminé do Queimador	Entrada de gases no queimador
	Temperatura na base da chaminé do queimador
	Temperatura na saída da chaminé do queimador
	Trecho 1
	Trecho 2
	Trecho 3
Gás de traço	Média temperatura nos Trechos
	Saída gás de traço 1
	Saída gás de traço 2
	Temperatura média do gás de traço na saída do sistema

As temperaturas foram monitoradas durante 72 horas de funcionamento do sistema de cogeração, avaliando-se dois fornos simultaneamente em carbonização, exceto nas primeiras 24 horas que se avaliou três fornos. Os resultados serão apresentados por dia, ou seja, de 24 em 24 horas.

As temperaturas dos gases foram obtidas de três em três horas, utilizando termopares fixados nas tubulações de transporte dos mesmos. As temperaturas médias foram obtidas considerando três situações: I) até a temperatura de 400 ºC na chaminé do queimador; II) após a temperatura de 400 ºC na chaminé do queimador e III) na situação de incêndio na tubulação quando este ocorreu. Utilizou-se esses critérios de amostragem, pois verificou-se em testes preliminares que temperaturas inferiores a 400 ºC na câmara de combustão do queimador não ocorre a queima dos gases.

Este fato pode ser observado na chaminé do queimador de gases, onde até 400 ºC verificou a presença de fumaça e após essa temperatura iniciou-se a queima e não teve mais a fumaça visível (Figura 11).

Figura 11 – Queimador: (A) Câmara de combustão do queimador com temperatura abaixo de 400 ºC e (B) Câmara do queimador com temperatura acima de 400 ºC.

30.4 Resultados e Discussão

A. Sistema supervisório do transporte de gases

Na Figura 12 é apresentada a tela de comando do sistema supervisório de transporte de gases. A tubulação em verde representa os gases da carbonização vindo dos fornos para o queimador central, e a tubulação em vermelho representa o gás de traço. As setas, em cor roxa, indicam as temperaturas avaliadas e seus respectivos pontos de coleta de dados.

O sistema coleta os dados online, tendo, portanto os valores de temperatura em tempo real, fazendo com que se tenha um maior controle do sistema de cogeração de função da possibilidade de intervenções pontuais para manter a temperatura na câmara de combustão do queimador de gases da carbonização.

As temperaturas dos gases, tanto de carbonização quanto de traço, na linha de transporte de gases foram coletadas conforme ilustrado nos trechos 1, 2 e 3, da tela de comando.

Vale lembrar que os valores referentes a “Chaminé Forno” 1, 2 e 3 dos gases da carbonização correspondem à temperatura de saída dos gases na chaminé de cada

forno em funcionamento no dia avaliado, sua média está representada no quesito "Média de chaminés" . Os valores do "Trecho" 1, 2 e 3, tanto do gás de carbonização quanto do gás de traço, correspondem aos valores de temperatura dos gases ao longo do trecho dos fornos 1-6, 7-12 e do trecho de junção destes, respectivamente, até o queimador (Figura 13). A "Entrada de gases no queimador" representa a temperatura de entrada dos gases da carbonização no queimador. A "Chaminé queimador" e "Saída Chaminé" correspondem à temperatura da chaminé do queimador e da sua saída, respectivamente. "Saída gás de traço" refere a temperatura de saída dos gases de traço do sistema.

B. Valores médios de temperatura dos gases em função do tempo de amostragem

Nas tabelas II, III e IV são apresentados os valores médios de temperatura obtidos durante 72 horas de avaliação do sistema de transporte de gases. Não se verificou incêndios nas tubulações nas primeiras 24 horas de avaliação. Temperatura na situação II, ou seja, temperatura na câmara de combustão se manteve acima de 400°C.

Observa-se que a temperatura média dos gases da carbonização foi de aproximadamente 131,5°C. A temperatura dos gases ao longo da linha de transporte de gases manteve-se a 147°C e os gases entraram no queimador com a temperatura média de 177,9°C. Isso evidencia que o gás de traço manteve aquecida a linha de transporte dos gases da carbonização até o queimador.

A temperatura de saída do sistema do gás de traço foi de aproximadamente 120°C. O mesmo saiu da chaminé do queimador a 238°C, tendo portando uma perda de calor de aproximadamente 50% ao longo dos trechos de transporte dos gases. Salienta que o gás de traço sai aquecido da linha de transporte podendo o mesmo ser utilizado, ainda, para a secagem artificial da madeira, ou seja, pode ser insuflado para os secadores.

Figura 12 – Sistema supervisório do transporte de gases.

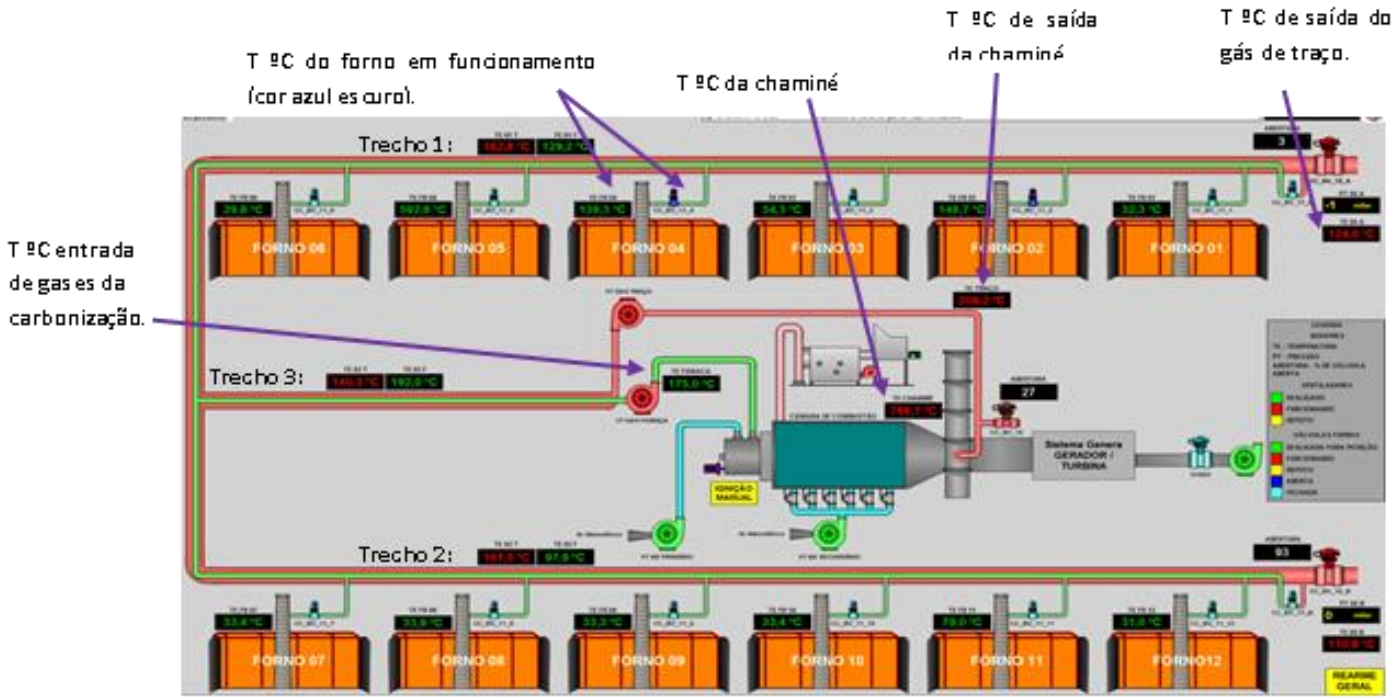


Figura 13 – Tela de comando do sistema de transporte de gases da carbonização para cogeração de energia elétrica na situação de incêndio no Trecho 3.

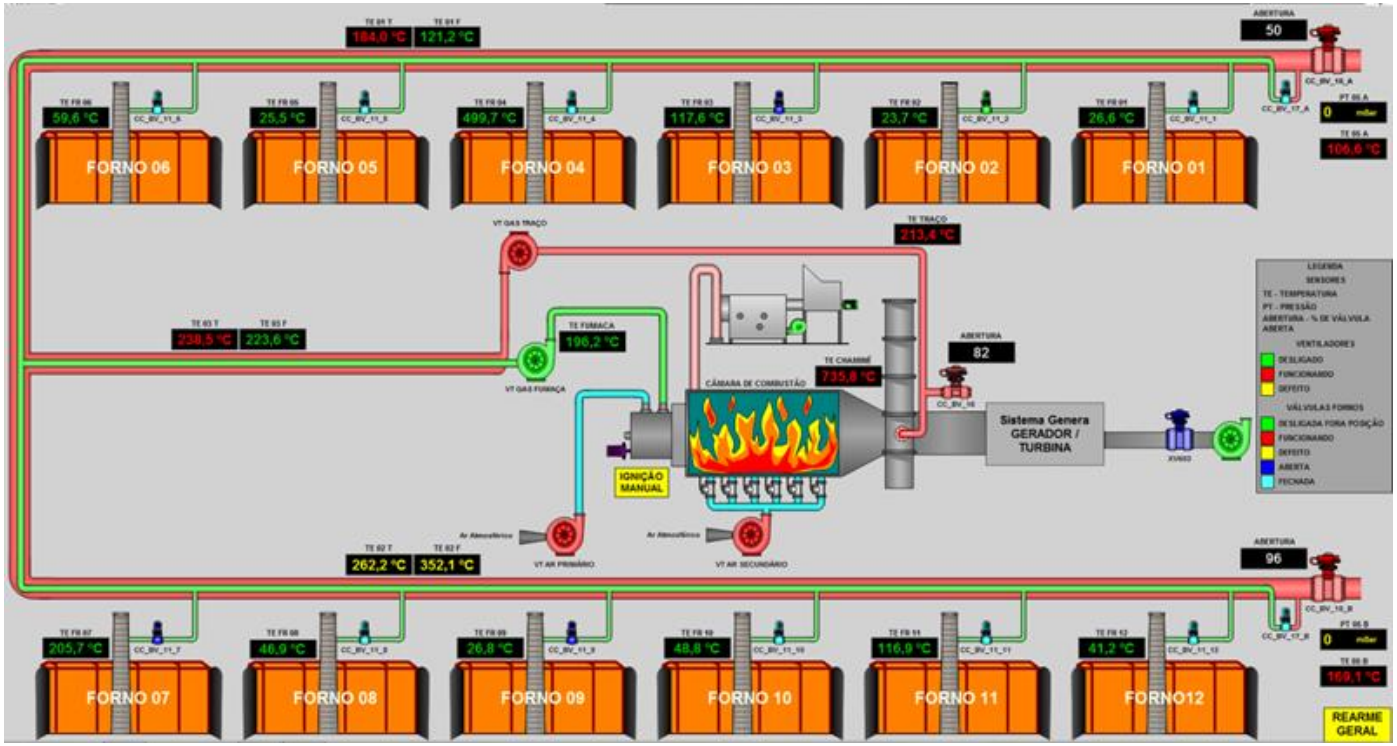


Tabela II – Valores médios de temperatura (°C) referentes as primeiras 24 horas.

Gás	Local de amostragem	Temperatura (^{o}C) Situação II
Gás de carbonização	Chaminé do Forno 1	169,03
	Chaminé do Forno 2	144,84
	Chaminé do Forno 3	80,18
	Média da temperatura na saída das chaminés	131,35
	Trecho 1	150,74
	Trecho 2	95,40
	Trecho 3	196,67
	Média de temperatura nos trechos	147,60
Gás combusto - Chaminé do Queimador	Entrada de gases no queimador	177,94
	Temperatura na base da chaminé do queimador	872,93
	Temperatura na saída da chaminé do queimador	238,54
Gás de traço	Trecho 1	166,92
	Trecho 2	159,86
	Trecho 3	143,40
	Média temperatura nos Trechos	156,73
	Saída gás de traço 1	129,26
	Saída gás de traço 2	109,43
	Temperatura média do gás de traço na saída do sistema	119,34

Tabela III– Valores médios de temperatura (°C) obtidos das 24 a 48 horas de funcionamento do sistema.

Gás	Local de amostragem	Temperaturas (°C)		
		Situação I	Situação II	Situação III
Gás de carbonização	Chaminé Forno 1	0,00	143,24	115,45
	Chaminé Forno 2	0,00	205,38	219,60
	Média da temperatura na saída das chaminés	0,00	174,31	167,53
	Trecho 1	49,30	96,23	239,83
	Trecho 2	23,30	98,38	204,05
	Trecho 3	32,60	168,88	227,73
	Média de temperatura nos trechos	35,07	121,17	223,87
Gás combustão – Chaminé do queimador	Entrada de gases no queimador	22,20	140,80	170,31
	Temperatura na base da chaminé do queimador	22,20	871,52	375,09
	Temperatura na saída da chaminé do queimador	21,40	214,15	146,79
Gás de traço	Trecho 1	51,00	108,72	282,74
	Trecho 2	24,70	131,62	207,93
	Trecho 3	30,90	130,80	263,79
	Média temperatura nos Trechos	35,53	123,71	251,48
	Saída do gás de traço 1	47,20	67,53	152,14
	Saída do gás de traço 2	27,10	70,77	118,48
	Temperatura média do gás de traço na saída do sistema	37,15	69,15	135,31

Tabela IV– Valores médios de temperatura obtidos das 48 a 72 horas de funcionamento do sistema.

Gás	Local de amostragem	Temperatura °C Situação I	Situação II
Gás de carbonização	Chaminé Forno 1	0,00	235,91
	Chaminé Forno 2	0,00	115,38
	Média da temperatura na saída das chaminés	0,00	175,64
	Trecho 1	50,00	122,36
	Trecho 2	16,80	105,69
	Trecho 3	28,83	164,95
	Média de temperatura nos trechos	31,88	131,00
Gás combusto – Chaminé do queimador	Entrada de gases no queimador	19,67	148,27
	Temperatura na base da chaminé do queimador	251,17	840,42
	Temperatura na saída da chaminé do queimador	21,00	193,11
Gás de traço	Trecho 1	46,87	127,04
	Trecho 2	15,40	141,88
	Trecho 3	19,80	140,63
	Média temperatura nos Trechos	27,36	136,51
	Saída do gás de traço 1	19,00	97,80
	Saída do gás de traço 2	17,40	93,78
	Temperatura média do gás de traço na saída do sistema	18,20	95,79

Neste período de avaliação, das 24 a 48 horas de operação do sistema de cogeração, observou-se a ocorrência de incêndio dentro da tubulação, representado pelo aumento contínuo da temperatura. Deve-se ressaltar que esses incêndios devem ser evitados, pois ocasionam além de perdas economicas, diminui a vida útil do sistema.

O incêndio começou as 17h19 quando a temperatura do gás de carbonização estava em 352 ºC no trecho 3, e foi finalizado as 22h48, com tempo de duração de 5h29. Apesar de o incêndio ter iniciado no trecho 3, o mesmo propagou-se pelos trechos 1 e 2 do gás de carbonização e atingiu as tubulações do gás de traço, quando este estava na temperatura de 262,2 ºC (Figura 13). Para reduzir a temperatura e cessar a combustão suspendeu imediatamente a injeção de combustível auxiliar pelo queimador pirolítico e abriu-se o ventilador de ar primário e secundário com a finalidade de resfriar o queimador de gases da carbonização.

A ocorrência de incêndio na linha de transporte dos gases da carbonização se deu, provavelmente, em função de pequenos vazamentos na tubulação devido a presen-

ça de trincas nos pontos de solda ocasionadas pelo aumento da temperatura. Essas trincas permitem a passagem de oxigênio para o sistema provocando a combustão dos gases da carbonização que são ricos em compostos combustíveis. O surgimento destas trincas se devem provavelmente ao material construtivo utilizado. Logo, novos materiais devem ser testados para minimizar os problemas. Na Tabela IV são apresentados os valores médios de temperatura obtidos no período de 48 a 72 horas de funcionamento do sistema de cogeração.

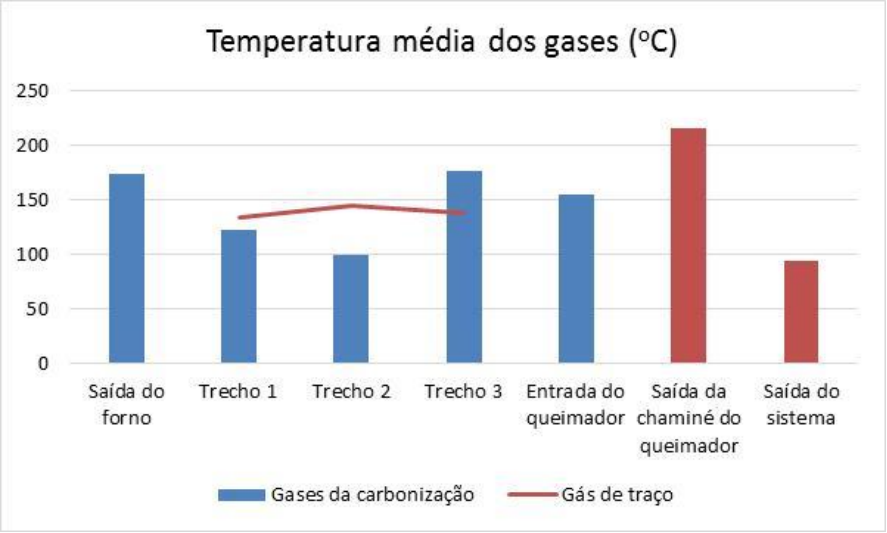
Não foram observados incêndios na tubulação durante essa avaliação, evidenciado pela não alteração da temperatura nos trechos avaliados. Observa-se que a temperatura média de saída dos gases de carbonização do forno 1 foi alta em relação aos valores observados anteriormente, elevando a média da temperatura dos gases de carbonização.

No entanto, ao longo do seu transporte até o queimador, verifica-se que a temperatura média foi de 131°C, ficando abaixo da temperatura média do gás de traço (136,51°C). A temperatura do gás de traço na saída da chaminé do queimador foi de 193,11°C, e saída do sistema de aproximadamente 95°C, tendo uma redução média, também, de 50%, ou seja, teve-se uma perda de 97°C ao longo da tubulação de transporte dos gases.

C. Valores médios de temperatura dos gases independente do tempo de amostragem.

Na Figura 14 encontra-se os valores médios da temperatura dos gases em função da posição de avaliação, durante o período total de 72 horas.

Figura 14 – Temperatura média dos gases em função do trecho.



De modo geral, verificou-se que a temperatura de saída dos gases de carbonização foi muito variável, devido as diferentes fases do processo de carbonização, ocasionando uma variação ainda maior quando ocorre a mistura dos gases no duto principal.

Verifica-se que a temperatura média dos gases de traço ficou acima da temperatura dos gases de carbonização nos trechos 1 e 2. No trecho 3 a temperatura média de carbonização ficou 38,55°C a mais que a temperatura do gás de traço. Vale salientar que o trecho 3, é onde ocorre a mistura de gases de fornos em diferentes fases de carbonização e portanto, diferentes vazões, concentrações de alcatrão e principalmente diferentes temperaturas, podendo ocorrer situações em que a temperatura da mistura seja consideravelmente inferior àquela do fluxo de maior temperatura que participa da mistura, ocorrendo a condensação do alcatrão e possíveis incêndios.

Observa-se que a temperatura da superfície do duto em contato com os gases de carbonização foi menor que a temperatura de vaporização deste componente na pressão estática interna ao duto, o que pode ter provocado condensação e deposição de alcatrão.

Observa-se que a temperatura média de saída do gás de traço corresponde a 44% da temperatura inicial, tendo uma perda de aproximadamente 120°C durante seu escoamento ao longo de toda extensão da rede de transporte de gases.

A temperatura média na base da chaminé do queimador foi de aproximadamente 860°C, e na saída da tubulação para o gás de traço essa temperatura cai para 215°C.

Observa-se na Figura 15 que a temperatura média dos gases da carbonização ao longo da linha de escoamento dos gases inicialmente tem uma queda no primeiro trecho, provavelmente devido a mistura com gases provenientes de outro forno em estágio inicial de carbonização, e depois ocorre um aumento no trecho principal quando ocorre a mistura de todos os gases independente do estágio do forno. Isso se deve, provavelmente, a temperatura do gás de traço (Figura 16) está mais alta nesta região proporcionando um aquecimento da linha dos gases da carbonização. Observa-se que a temperatura nos trechos 1, 2 e 3 se manteve mais estável, com pouca variação. Verificou-se uma perda de calor de aproximadamente 120,51°C ao longo de toda a rede de transporte de gases.

Figura 15 – Temperatura dos gases da carbonização ao longo da linha de escoamento.

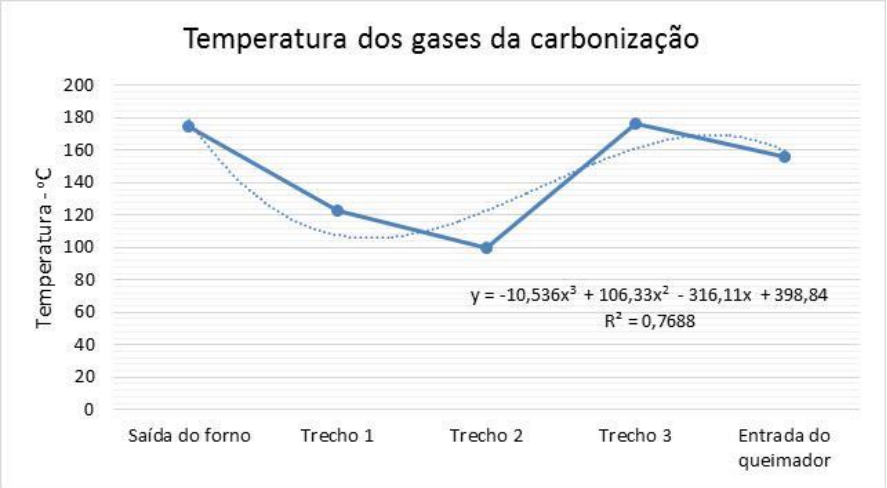
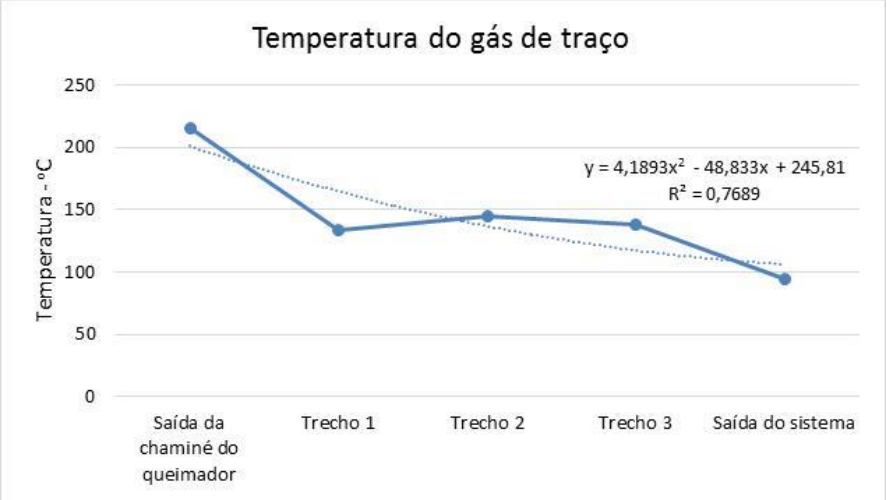


Figura 16 – Temperatura do gás de traço ao longo da linha de escoamento.



D. Sistema de Cogeração

O sistema de transporte instalado juntamente com o *cluster* permite o transporte de 5.000 a 17.000 Nm³ de gás que transforma em 30 e 55 kWh respectivamente. O sistema de cogeração implantado é mostrado na Figura 17, contemplando o sistema de transporte de gases, de aproveitamento de resíduos florestais e de cogeração usando uma turbina de queima externa (EFGT).

Figura 17 – Sistema de cogeração completo.

Este sistema de transporte de gases atende exclusivamente os 12 fornos interligados ao sistema de queima e cogeração. Para ampliação da produção de energia elétrica, é necessário recalcular a dimensão da turbina, que atualmente possui uma potência de 100 kW. Tal dimensão se deve essencialmente ao caráter demonstrativo e original da pesquisa e principalmente devido a disponibilidade de escala por parte dos fornecedores. Este equipamento, como possui projeto construtivo que prevê temperatura ambiente de operação menor do que a que se vivencia no Brasil, teve a sua potência máxima limitada a 67 kW. De acordo com os testes e dados coletados, verificou-se que o desenvolvimento específico de micro-turbinas a gás aquecido é essencial para viabilização de cogeração de energia para unidades industriais de pequeno e médio porte (potencial de cogeração inferior a 1 MWe) e pode ser extremamente atrativa para unidades de grande porte; A capacitação progressiva destas unidades industriais como fornecedoras de energia elétrica gera uma rede complementar de consumo e de geração distribuída; Do ponto de vista ambiental, as UPCs com sistemas de cogeração poderão ser entendidas como unidades termoelétricas a base de combustível renovável (florestas plantadas) e custo nulo (pois a madeira seria necessariamente carbonizada para produção do carvão vegetal).

Sugere estudar um novo arranjo de condução dos gases da carbonização. O modelo de dutos subterrâneos de alvenaria com inclinação para o queimador poderá ser utilizado. Com este modelo, não há necessidade de utilização de gases de traço.

A expectativa de vida útil dos exaustores/ventiladores, das tubulações de gases de traço e de carbonização é de 2 anos e para os demais equipamentos 10 anos.

O sistema mostra viabilidade técnica podendo ser construído em maiores dimensões para atendimento industrial e comercial.

E. Dificuldades

As maiores dificuldades do projeto estiveram associadas a complexidade inerente a pesquisa. No início do projeto havia a expectativa de que a execução deste projeto de desenvolvimento resultasse em um protótipo consolidado que orientasse de forma definitiva a elaboração de estudos e planos de negócios utilizando gases residuais para a cogeração. Entretanto a execução mostrou um cenário mais complexo do que inicialmente previsto. O sistema implantado funciona e atende a proposta de utilização. Contudo apresenta problemas e dificuldades operativas, levando a constatação de que para minimizar estes problemas e consolidar a tecnologia sejam essenciais testes com outras configurações e materiais.

Apesar do potencial se mostrar interessante, com uma expectativa de 250 MW no Brasil (sendo 50% no estado de Minas Gerais), não se pode contar de forma firme com esse valor, uma vez que o setor siderúrgico vem desde 2008 passando por grandes mudanças o que incorpora incertezas em empreendimentos e seus desdobramentos. Desta forma identifica-se que seria importante um estudo de natureza econômica e de futuro sobre o setor, buscando avaliar não somente os gases residuais mas a própria energia da biomassa dos maçicos florestais. Outra carência para a aplicação desta tecnologia é um mapeamento que indique de fato quais são os locais de potencial para que se possa aprofundar em uma investigação de natureza empresarial e de negócio.

F. Benefícios

Os gases gerados na carbonização dos 12 fornos corresponde a valores aproximados de 1000 kWh. Se considerarmos uma eficiência do processo de 20%, o potencial de geração dos 12 fornos, teoricamente (equipamentos com novas configurações), pode chegar a 200 kWh. É importante observar que se o transporte de gases for implantado em toda a planta pode resultar em uma potência de 1,6 MW (96 fornos).

A ArcelorMittal Biofloresta pode investigar a possibilidade de utilização do gás residual do processo de carbonização a madeira. A Cemig por outro lado buscou consolidar parâmetros para avaliar a viabilidade técnica e econômica de projetos de cogeração ou a aplicabilidade de projetos de eficiência energética. Além disso, encontra-se em desenvolvimento o pedido de patente para os desenvolvimentos realizados neste projeto.

A Universidade Federal de Viçosa pode alocar pesquisadores e bolsistas nas investigações deste projeto. De maneira específica ao sistema de transporte de gases, houve uma defesa de mestrado e a expectativa de uma publicação técnica em revista indexada, que se encontra em elaboração.

A comunidade acadêmica e a sociedade em geral tiveram acesso as informações deste projeto que foram disponibilizadas em decorrência do Workshop de Encer-

ramento do projeto, que contou com a presença de 50 pesquisadores e cujo material encontra-se na área de Inovação/Alternativas Energéticas no site da Cemig.

Apesar do projeto ter se encerrado, de maneira natural a uma pesquisa, muitas questões que surgiram ao longo da execução e implantação experimental permanecem sem respostas. A ArcelorMittal junto com a UFV continuarão as pesquisas com recursos de outras fontes de financiamento e a Cemig e o setor elétrico continuarão a ter acesso aos resultados das pesquisas e seus desdobramentos.

30.5 Conclusões

O sistema de transporte de gás de carbonização metálico e aéreo apresentou potencial para ser utilizado nas UPC (unidade produtoras de carvão vegetal).

A utilização do gás de traço para manter a linha aquecida mostrou-se eficiente, tendo uma perda de temperatura total de 50%, ou seja, manteve-se de modo geral, a temperatura acima do gás de carbonização até a saída.

O grande número de encaixes, soldas, nas tubulações, proporciona vazamentos e consequentes incêndios na linha de transporte dos gases da carbonização.

A dificuldade de sincronismo nos fornos proporciona variação drástica de temperatura e vazão dos gases, principalmente, no trecho principal de transporte dos gases, logo uma unidade com maior número de fornos interligados minimiza esses problemas fazendo com se tenha de forma permanente maior vazão de gases "ricos" para o queimador.

Para minimizar os riscos de condensação e deposição de componentes do alcatrão na linha de transporte de gases dos fornos de carbonização até a planta de cogeração sugere-se deslocar os gases dos fornos para o duto principal de coleta após cerca de 20 horas de processamento.

Recomendam-se estudos para minimizar os vazamentos de gases de carbonização para evitar incêndios na linha de transporte dos gases e estudos de sincronismos dos fornos para manter a temperatura na linha de escoamento dos gases mais homogênea.

Conclui-se, portanto, que o sistema de transporte de gases utilizando gás de traço apresenta-se como uma alternativa para escoar os gases da carbonização, no entanto a condensação e a deposição de componentes do alcatrão na linha de dutos continuam sendo um desafio à adequada operação da instalação como um todo, bem como a presença de trincas nos pontos de solda das tubulações, necessitando de estudos na área de resistência de materiais.

Capítulo 31

Capítulo 31: Gaseificação de Biomassa para Acionamento de Células a combustível do tipo SOFC[31]

***Resumo*- O desenvolvimento em geração distribuída no final dos anos de 1990 trouxe uma grande expectativa para com o uso e a popularização de tecnologias alternativas juntamente com os benefícios ambientais e sociais associados. Neste contexto, o uso da gaseificação de biomassa se apresenta como uma opção interessante. Entre as aplicações do gás resultante da gaseificação estão: o uso como precursor químico e a produção de eletricidade. Neste último caso, as células a combustível se apresentam como equipamentos eficientes. Contudo, um dos gargalos dessa aplicação encontra-se no sistema de purificação do gás produzido e acondicionamento para o uso nos requisitos da célula a combustível. Desta forma, o presente projeto buscou desenvolver um protótipo experimental de gaseificação de biomassa acoplado a uma célula a combustível do tipo SOFC. Os resultados indicam que o gás produzido apresenta características que permitem o seu uso.**

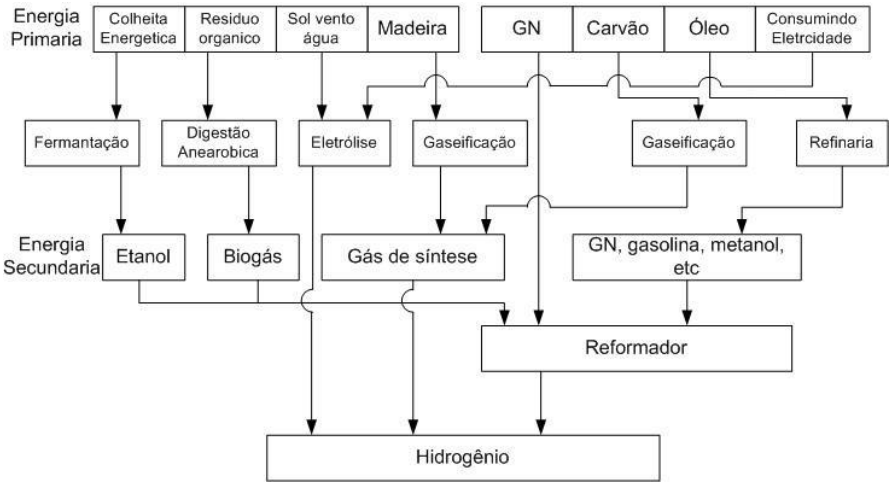
31.1 Introdução

A célula a combustível de óxido (SOFC) é reconhecida como uma tecnologia promissora para o futuro de geração estacionaria. Seu eletrólito sólido, resistente à corrosão, oferece maior facilidade de manejo e controle da temperatura. Devido a sua temperatura de operação, se consegue evitar a utilização de metais nobres com função de catalisador, facilita a aplicação da cogeração e trigeração, oferece flexibilidade no combustível de origem, incluindo o gás natural, biomassa e carvão gaseificado, amônia e hidrocarbonetos líquidos reformados [1]. Este equipamento combina a eficiência elétrica elevada se comparado com outros acionadores primários (45-60%) e com baixas emissões.

Na Figura 1 pode-se verificar que a biomassa se constitui em uma opção para a produção de hidrogênio, através do processo de gaseificação. A gaseificação de biomassa é um processo de conversão termoquímica, que permite obter um gás combustível, cuja composição depende de fatores como a composição da biomassa usada, agente de gasificação, condições de operação, tipo de gaseificador, entre outros [2]-[3].

[31] GIRALDO, S. Y.; COBAS,V. M.; LORA, E. E. S.; LOPES, B. M.; SILVA, C. H. F. da.. Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

Figura 1 – Principais formas de produção de hidrogênio [4].



O gás resultante da gaseificação de biomassa é uma mistura de hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), vapor de água (H_2O), e outros componentes secundários [5]. Na tabela I é mostrada a composição do gás obtido na gaseificação de biomassa em diferentes tipos de gaseificadores.

Tabela I – Composição do gás de gaseificação de biomassa.

Tipo de reator	**Agente**	**Composição (%Vol., base seca)**					**Ref.**
		CO	**CO_2**	**CH_4**	**H_2**	**N_2**	
CFBG [1]	Ar	20	12	2	20	45.5	[6]
Downdraft	Ar	20	13	1.50	17	37	[7]
Downdraft	Vapor /O_2	39.21	25.75	3.29	30.51	-	[8]
Updraft	Ar	24	9	3	11	53	[9]
BFBG [2]	Vapor /O_2	23	16.9	7.9	52.2	-	[10]

[1] Fluidizado circulante. [2] Fluidizado borbulhante.

Os principais produtos secundários presentes no gás são considerados impurezas, podem ser classificados como: material particulado, compostos de enxofre (sulfeto de hidroênio - H_2S, sulfeto de carbonilo – COS e enxofre orgânico), compostos de nitrogênio (cianeto de hidrogênio - HCN, e amônia - NH_3), compostos ácidos (ácido clorídrico - HCl), metais voláteis (compostos alcalinos de sódio - Na e potássio - K) e alcatrão (compostos aromáticos pesados e/ou hidrocarbonetos insaturados com peso molecular maior que o do benzeno, com ponto de ebulição relativamente alto) [9]-[11].

Essas impurezas, mesmo em baixas concentrações, devem ser removidas, sendo que o nível de remoção depende da aplicação final do gás [12]. Eles são responsáveis pelo entupimento, pela corrosão, por envenenamento e por deposição de carbono em válvulas, tubulações e equipamentos a jusante do gaseificador, se acumulando em motores, turbinas, células a combustível, dentre outras partes do sistema [5]; [11]; [13]-[14].

O gás produto da gaseificação de biomassa pode ser limpo em processos a baixa temperatura, tipicamente inferiores a 673 K ou a alta temperatura, na faixa de 973-1273 K.

Uma vez que a temperatura de entrada na SOFC é aproximadamente de 1123-1173 K, o uso de sistemas de limpeza do gás a alta temperatura poderia ser mais adequada, eliminado a necessidade de resfriamento e reaquecimento do gás e ainda contribuindo para que a eficiência global do sistema se mantenha elevada devido à menor perda de calor. No entanto, a limpeza a alta temperatura é considerada cara se comparada com os sistemas à baixa temperatura.

A seleção adequada do sistema de gaseificação pode ajudar na redução dos impurezas presentes no gás, como acontece com os gaseificadores de leito fixo concorrente de dupla entrada de ar, que permitem obter um gás com menor fração de partículas e de alcatrão [15]-[17]. No entanto, para se atingir os requerimentos da SOFC, a pureza do gás deve ser maior se comparada com os requerimentos para outros equipamentos [18]-[19].

Neste contexto foi desenvolvido o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) nº 237 (Código Aneel: PD-4590-0020/2006) no âmbito do Programa de P&D Cemig/Aneel. Resultou da parceria entre a Cemig Distribuição e a Universidade Federal de Itajubá.

Como principal resultado o projeto teve o desenvolvimento de um protótipo demonstrativo de gaseificação de biomassa aplicável no fornecimento de gás rico em hidrogênio para células a combustível do tipo SOFC.

A metodologia empregada no desenvolvimento do projeto foi a experimentação baseada no estado da arte da tecnologia e levando-se em consideração as metas do projeto juntamente com os objetivos estratégicos das organizações interessadas no desenvolvimento de geração distribuída.

31.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A. P&D Cemig/Aneel nº 237

Este projeto foi realizado entre abril/2008 e outubro/2012 e encontra-se tecnicamente encerrado, tendo um custo total de R$ 843.600,00. Teve como objetivo fundamental a produção de um gás com a qualidade requerida pelas células a combustível de óxido sólido, a partir da gaseificação da biomassa [20].

A célula a combustível utilizada nos testes dentro do projeto de P&D Cemig/Aneel nº 001, e é apresentada na Figura 2.

Esperava-se que com a consolidação da tecnologia estudada e desenvolvida neste projeto se possa produzir uma opção de fornecimento de energia na forma de geração distribuída, de maneira a contribuir com a expansão da rede de energia elétrica e atendimento aos consumidores com menores custos. Esperava-se também desenvolvimento de novos serviços de cogeração e trigeração, podendo se consti-

tuir em novos negócios para as concessionárias de energia. Entretanto, as dificuldades inerentes a tecnologia indicam que a complexidade do problema a ser enfrentado é maior do que inicialmente prevista, havendo então a postergação das expectativas de implantação da tecnologia.

Figura 2 – Célula SOFC adquirida no P&D 001 – NEST/Unifei.

B. Metodologia

A metodologia utiliza é descrita brevemente a seguir [22]:

- Revisão bibliográfica sobre o estado da arte de SOFC;
- Modelagem dos processos de gaseificação, reforma e uso do gás na SOFC;
- Projeto e fabricação do gaseificador de biomassa em vários estágios;
- Montagem e testes do gaseificador de biomassa;
- Modificações do gaseificador e adaptação de instrumentação analítica (cromatografia gasosa);
- Análise dos gases do gaseificador;

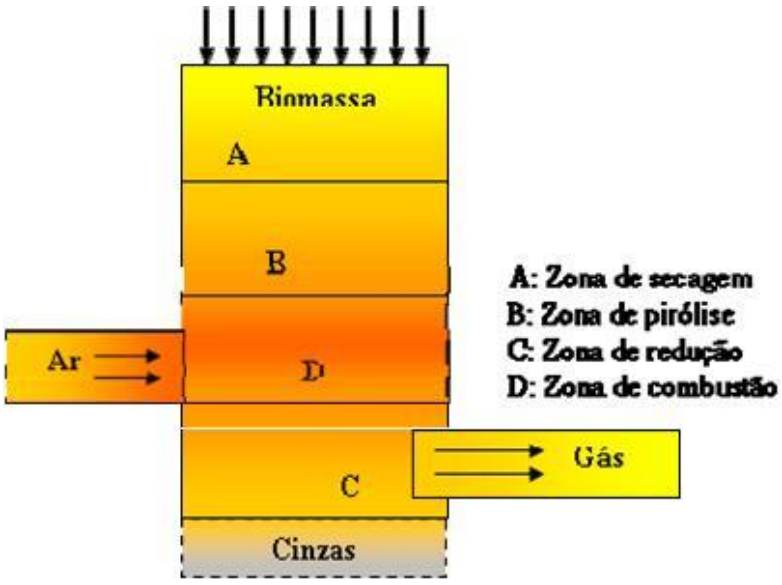
- Projeto construção e testes de um sistema de limpeza catalítica e purificação do gás;
- Avaliação da qualidade do gás após o sistema de limpeza;
- Construção ou seleção e testes do reformador;
- Modelagem do conjunto gaseificador/sistema de limpeza/reformador/célula a combustível;
- Integração e testes do sistema gaseificador/sistema de limpeza/SOFC;
- Avaliação do conjunto gaseificador/sistema de limpeza/reformador/célula a combustível.

C. Modelagem do Gaseificador

Para o trabalho de modelagem e simulação foi utilizado o programa CSFMB (*Comprehensive Simulator of Fluidized and Moving Bed*) desenvolvido pelo Prof. Dr. Marcio de Souza-Santos (Unicamp).

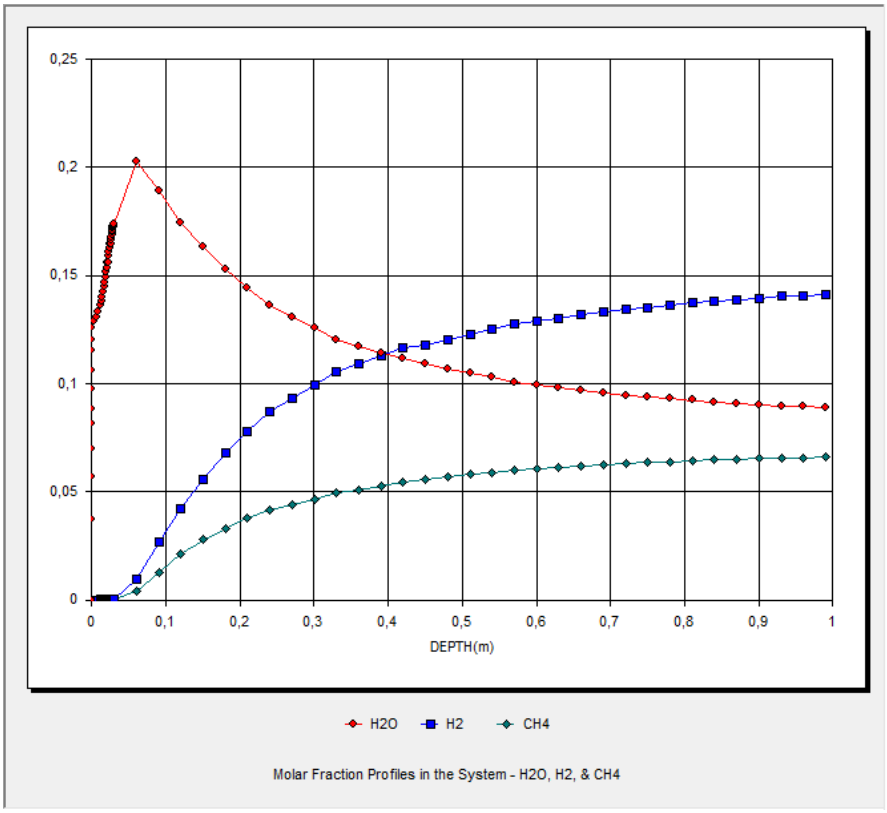
Na gaseificação em leito fixo tipo concorrente, o combustível é fornecido pela parte superior. O ar e o gás produzido se movimentam em sentido descendente. A principal vantagem deste tipo de reator é a pouca quantidade de alcatrão presente no gás produzido, devido a quebra térmica do mesmo ao passar pela zona de combustão, que se trata da região de alta temperatura do processo [23]. Na Figura 3, é apresentado um esquema geral do reator, assim como as diferentes zonas do processo de gaseificação.

Figura 3 – Esquema gaseificador em reator de leito fixo concorrente e as zonas do processo de gaseificação.



Para a simulação, foram levados em conta: dados construtivos do gaseificador, características físico-químicas da biomassa utilizada e dados operacionais. O agente de gaseificação considerado foi ar, com uma composição molar de 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio na temperatura ambiente. Como ilustração do processo de modelagem apresenta-se na Figura 4, onde é possível visualizar a previsão de comportamento reacional para o elemento de interesse (hidrogênio) em função do tamanho do reator, resultante de simulação do modelo desenvolvido.

Figura 4 – Evolução da composição de H_2O, H_2 e CH_4 (fração molar) com relação à altura do gaseificador.



D. Gaseificador: montagem e testes

O gaseificador utilizado nos testes é um reator tipo *downdraft* com duplo estágio de fornecimento de ar e um ciclone instalado nos laboratórios do NEST/UNIFEI. O equipamento foi projetado e fabricado pela empresa Termoquip Energia Alternativa Ltda. A Figura 5 apresenta uma fotografia do reator e um esquema geral do sistema de gaseificação com a localização dos termopares.

As características nominais do equipamento são apresentadas na tabela II [24].

Figura 5 – Gaseificador tipo *downdraft* usada nos testes [24].

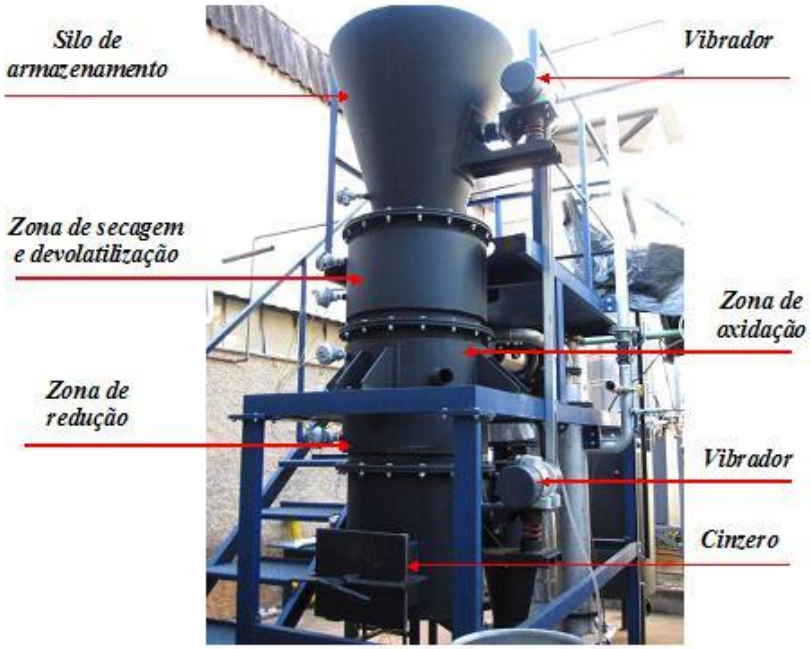


Tabela II – Características nominais do gaseificador.

Parâmetro	**Valor**
Potencia térmica	50 kW_t
Consumo de biomassa (base seca)	10 kg/h
Consumo de biomassa (base úmida- 15%)	12 kg/h
Granulometria da biomassa	2-6 cm

O material do gaseificador é aço ao carbono com revestimento interno de material refratário. Diâmetro externo é de 50 cm e diâmetro interno de 30 cm. Altura do equipamento, desde a parte superior do primeiro estágio até a grelha, 1,06 m e considerando o silo e a grelha, 2,2 m. Seis termopares do tipo K estão dispostos ao longo do reator para monitorar as temperaturas em diferentes pontos. Dois termopares são usados para medir a temperatura do ar e outro para a temperatura de saída do gás produzido. O ar é inserido no gaseificador por um ventilador (1900 mm H_2O). A vazão de ar é determinada usando uma placa orifício, de acordo com a metodologia da ISSO 5167-2.

Para a realização dos testes foi necessária a preparação da biomassa para o tamanho adequado, correspondente a um cubo de aproximadamente 6 cm de aresta. Isso foi feito para favorecer o processo de gaseificação evitando a formação de canais preferenciais e zonas mortas no interior do reator, assim como o predomínio da reação química frente aos fenômenos de transferência de massa e de energia [25]. Na Figura 6 apresenta-se a biomassa em seu tamanho adequado.

Figura 6 – Biomassa utilizada na gaseificação, já no formato adequado.

As variáveis de entrada controláveis foram a vazão volumétrica total de ar alimentado ao gaseificador e sua proporção entre os dois estágios de fornecimento (Ra - coeficiente das vazões de ar entre o primeiro e o segundo estágio). As variáveis de resposta consideradas na avaliação experimental foram o poder calorífico inferior, potência do gás produzido e eficiência a frio.

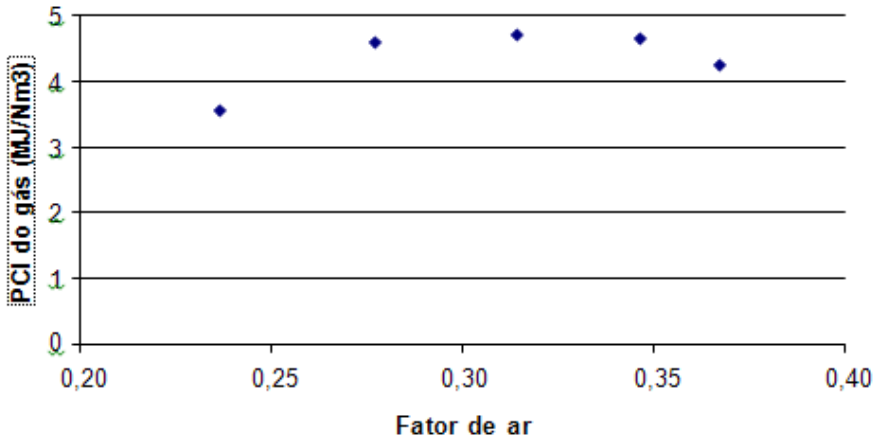
Em total foram realizados os experimentos conforme indicado na tabela III. Os resultados mostrados foram determinados a partir das medições de concentração dos gases energéticos (CO, CH_4 e H_2), a vazão de ar alimentada, e um balanço de massa e energia do processo.

Tabela III – Resultados do segundo teste preliminar.

CO (%)	CH_4 (%)	H_2 (%)	PCI (MJ/Nm^3)	Vazão de ar no 1º estágio (Nm^3/h)	Vazão de ar no 2º estágio (Nm^3/h)	Rel. entre vazão no 2º e 1º estágios	Fator de ar	Temp. zona de combustão (ºC)
21,2	0,1	7,95	3,57	0	12,04	0	0,237	700
17	1,8	12,3	4,12	0	14,11	0	0,277	770
19	1,3	13,3	4,30	0	14,11	0	0,277	809
20,3	0,9	13,75	4,37	0	14,11	0	0,277	830
21,5	0,8	14,5	4,57	0	14,11	0	0,277	843
21,6	0,8	14,6	4,59	0	14,11	0	0,277	835
21,9	0,8	14,75	4,64	4,79	12,83	2,68	0,346	846
21,7	0,7	14,94	4,60	4,79	12,83	2,68	0,346	819
22	0,7	15,17	4,67	4,79	12,83	2,68	0,346	828
22,3	0,7	15,05	4,69	4,79	11,2	2,34	0,314	828
21,6	0,9	15,29	4,70	4,79	11,2	2,34	0,314	814
21,4	1	15,26	4,71	4,79	11,2	2,34	0,314	793
21,2	0,9	15,19	4,64	4,79	11,2	2,34	0,314	788
21,3	0,8	14,91	4,59	4,79	11,2	2,34	0,314	794
21,3	0,8	14,6	4,55	7,48	11,2	1,50	0,367	810
20,9	0,8	13,66	4,40	7,48	11,2	1,50	0,367	813
20,7	0,7	12,86	4,25	7,48	11,2	1,50	0,367	814

De forma ilustrativa dos resultados dos testes, na Figura 7 é apresentado a variação do ar no processo de gaseificação. É possível verificar que na faixa de 0,30 de excesso de ar estequiométrico obtém-se um gás com melhor poder calorífico. Os resultados da composição de gás foram satisfatórios, obtendo-se um poder calorífico médio de 5,4 MJ/Nm³ condizente com valores da literatura consultada. As variações na composição do gás foram pequenas, o que permite observar a estabilidade do reator durante a operação em regime continuo [25].

Figura 7 – Efeito do ar no PCI do gás produzido.



Nas Figuras 8-9 apresentam-se o perfil de concentrações de CO, CH_4, H_2, PCI e a distribuição de temperatura no interior do reator respectivamente para Ra= 80%, que foi uma condição estável encontrada. A uma vazão de ar de 20 Nm^3/h é obtida a concentração de CO de 19,04 % em volume no gás produzido, e a menor concentração de CH_4 de 0,89 % em volume. A concentração de H_2 e o PCI mostraram um leve acréscimo, para 22 Nm^3/h, chegando a 16,83 % em volume e 4,54 MJ/Nm^3, respectivamente. A partir desta vazão de ar, o processo começa a ser favorecido pela combustão, como mostra a Figura 8 [26]-[27].

Figura 8 – Perfil de concentração de CO, CH_4 e H_2, e PCI para Ra = 80%.

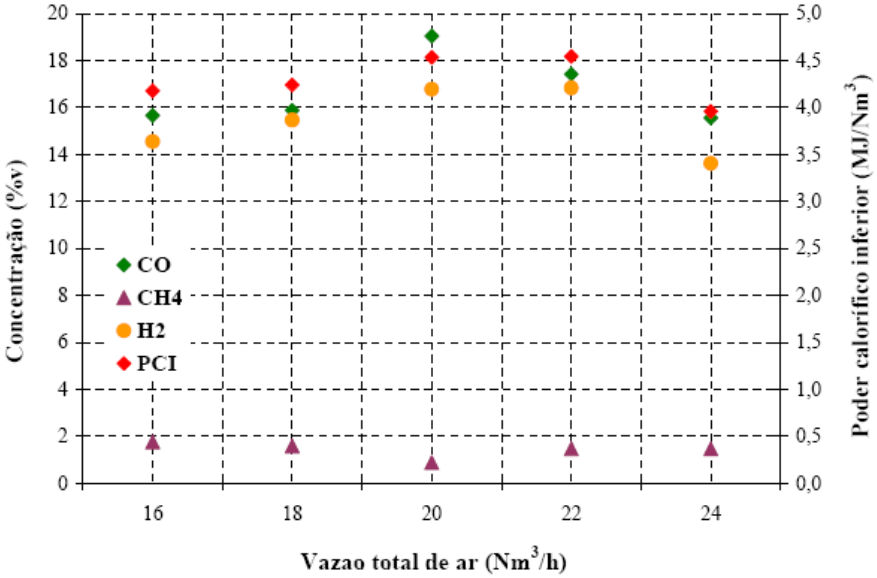
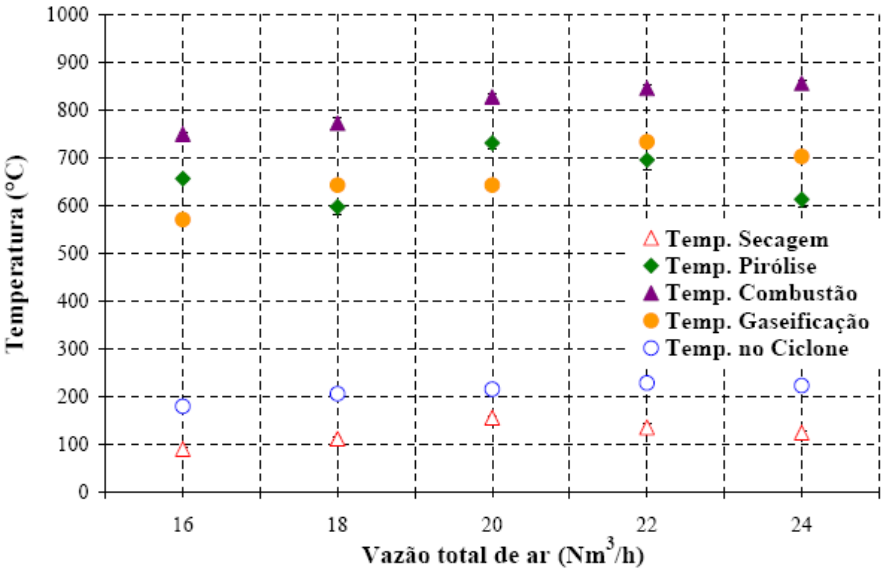


Figura 9 – Perfil de temperaturas no gaseificador para Ra = 80%.



E. Sistema de limpeza

A definição de ponto de operação do sistema de limpeza recaiu em um sistema que opere a baixas temperaturas. Foi projetado e construído um sistema de limpeza cujo ponto de operação pelo projeto foi definido em temperaturas inferiores a 400 °C, composto por dois lavadores, dois filtros e um reator de leito fixo. Este sistema é instalado após o sistema de gaseificação.

A Figura 10 indica os principais requerimentos do sistema [28]-[29]. Note que o sistema de limpeza ocorre em temperatura abaixo do processo de gaseificação.

Figura 10 – Requerimentos do sistema de limpeza.

Equipamento	Função	Temperatura Max de operação (°C)
Filtro de areia.	Remover partículas maiores	150
Lavadores Venturi.	Remover partículas, alcatrão	150
Lavador spray	Remover compostos ácidos	150
Reator de leito fixo com dolomita.	Craqueamento catalítico do alcatrão	850
Reator de leito fixo com carvão ativado.	Remover compostos de enxofre	150
Filtro cerâmico ou de mangas	Remover partículas finas	350
Requerimentos do sistema		
Capacidade do sistema de limpeza	140	NL/min
Bombas e medidores de fluxo para garantir os fluxos de gás e do liquido nos lavadores		
Válvulas de amostragem e de controle dos fluxos nos equipamentos		
Manômetro no filtro cerâmico ou de mangas para detetar o entupimento		
Termopares para controlar a temperatura do processo		

Os equipamentos foram construídos com aço inoxidável 304 e isolados com lã de vidro. O reator de carvão ativado e o filtro cerâmico são aquecidos com três resistências elétricas cada e a temperatura é monitorada usando termopares do tipo K que estão ligados aos controladores de temperatura. A Tabela IV mostra as características de projeto dos equipamentos e a Figura 11 apresenta o sistema de limpeza construído.

Tabela IV – Características nominais do Sistema de limpeza.

Parâmetro	**Filtro de Areia**	**Lavador Venturi**	**Lavador nebulização**	**Reator leito fixo**	**Filtro Cerâmico**
Composto a remover	Partículas grossas e alcatrão	Alcatrão Partículas	Compostos ácidos	Compostos de enxofre	Partículas finas
Vazão de gás (Nm^3/h)			8,40		
Diâmetro externo (mm)	219	168	168	219	219
Comprimento (mm)	500	980	1030	550	1400
Material no interior	Areia 2-5 mm Serragem de madeira	-	Esferas de polietileno 3-4 mm	Carvão ativado 5 mm	4 Velas 950 mm comprimento
Queda de pressão estimada (mbar)	100	-	-	100	50
$T_{max.}$ de operação (ºC)	150	150	150	150	400

Figura 11 – Sistema de limpeza construído.

F. Coleta de dados, caracterização e amostragem.

A concentração dos gases principais foi determinada usando analisadores contínuos; BINOS 100 e MaMos para os teores, em volume, de CO, CO_2 e CH_4, HYDROS 100, HY-OPTIMA para o teor de H_2 e cromatografia gasosa usando o Micro CP 4900 Varian-Agilent com três canais e detector TCD.

Na coleta das amostras de impurezas (material particulado, alcatrão, HCl e H_2S) foi usado o método de amostragem isocinética e para a analise foram adaptadas metodologias reportadas pela EPA [30]-[31] e pelo ECN [32].

Na Figura 12 é mostrado um diagrama de fluxo da metodologia de analise dos contaminantes e o esquema do sistema da amostragem isocinética. O sistema de amostragem da Figura 13 é dividido em três módulos básicos. O primeiro está formado por o tubo de pitó e o filtro de fibra de vidro, os dois com sistema de aquecimento para evitar a condensação antes de entrar em contato com o solvente. O segundo o sistema de absorção com seis tubos borbulhadores (impinger) onde são recolhidos os contaminantes condensados, os quais são mantidos a 0°C para coleta de H_2S e HCl, no caso do alcatrão ver tabela V. O terceiro módulo a bomba

e o sistema de medição de volume do gás [29]. A coleta das impurezas é feita uma vez que o gaseificador atinge o regime permanente, durante um período de uma hora para alcatrão e HCl e quinze minutos para H_2S.

Figura 12 – Metodologia de analise e sistema de coleta das impurezas do gás.

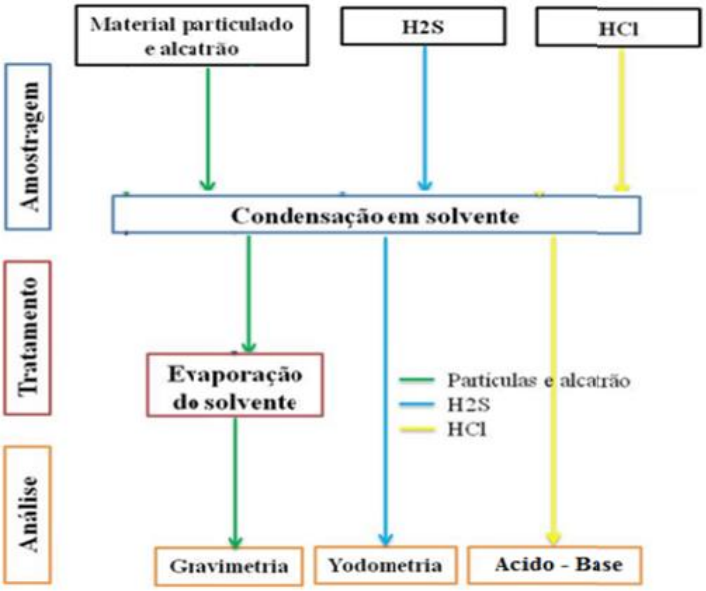


Figura 13 – Esquema geral de amostragem isocinética.

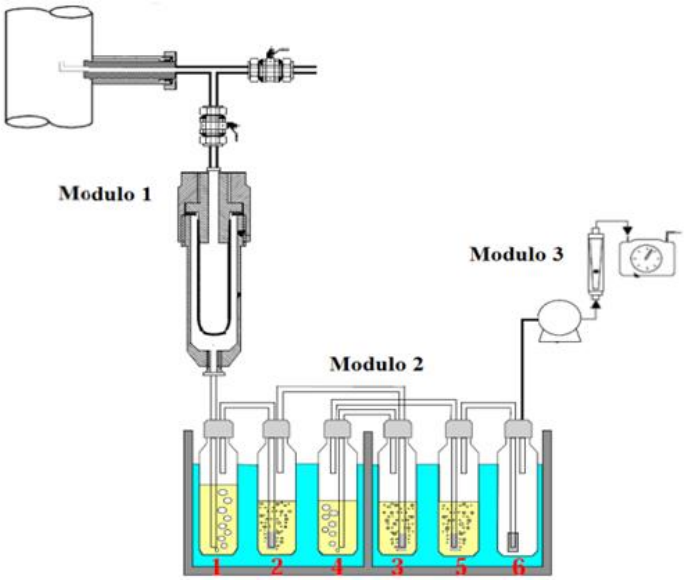


Tabela V – Reagentes e condições para amostragem.

Impinger	T (ºC)-alcatrão	Alcatrão	H_2S	HCl
1	20-40	Vazio	H_2O_2	Vazio
2	20-40	Isopropanol	Vazio	H_2SO_4
3	-10	Isopropanol	$CdSO_4$	H_2SO_4
4	20-40	Isopropanol	$CdSO_4$	NaOH
5	-10	Isopropanol	$CdSO_4$	NaOH
6	-10		Sílica gel	

G. Biomassa

A biomassa utilizada foi o eucalipto, pela facilidade e custo de obtenção. Na tabela VI são apresentadas as características da biomassa.

H. Reformador

O reformador foi um equipamento previsto no inicio do projeto com a intenção utilizar o gás de síntese resultante do gaseificador para produzir hidrogênio, que seria utilizado na célula SOFC. Este equipamento apresenta algumas limitações de operação como temperatura, a qual deve ser acima de 800°C. O sistema de limpeza desenvolvido se mostrou satisfatório para uso do gás na célula a combustível, portanto esta etapa não foi necessária, reforçado por informações obtidas com fabricantes [29].

Tabela VI – Características da biomassa.

Parâmetro	Valor
Teor de umidade (%)	12.23
Teor de cinzas (%)	1.34
Teor de Voláteis (%)	83.27
Teor de Carbono Fixo (%)	15.66
Poder calorífico superior (kJ/kg)	19351.67
PCI (kJ/kg)	18432.67
C (%)	45.78
N(%)	5.92
H(%)	3.21
S(%)	0.093
O(%)	42.83

31.3 Resultados Experimentais e Discussão.

A. Composição do gás.

Na Tabela VII são apresentados os resultados de composição do gás (CO, H_2, CH_4, CO_2), teor de alcatrão, material particulado, HCl e H_2S para cada um dos testes realizados.

De acordo com os resultados da Tabela VII, a operação do gaseificador com dois estágios de ar favorece a redução de todas as impurezas medidas. O aumento na quantidade de ar aumenta a temperatura da zona de combustão, favorece a quebra térmica do alcatrão, acontecendo o mesmo como a redução de H_2S e HCl. Na figura 14 é mostrado o conteúdo das impurezas em função do ar. É possível observar que o teor de impurezas diminui com a variação do ar sendo 80% onde apresenta o menor valor para cada um deles. No caso do H_2S, o maior teor (11 mg/Nm^3) é obtido quando o reator é operado como um gaseificador comum, usando uma entrada de ar só e acontece igual para os outros contaminantes. Nas Figuras 15 e 16 o conteúdo de partículas e alcatrão em função da quantidade de ar e a temperatura na zona de combustão.

De acordo com a Figura 16, o conteúdo de alcatrão diminui drasticamente com o aumento da quantidade de ar fornecido no gaseificador, mesmo que o uso de dois estágios de ar o que permite atingir maiores temperaturas na zona de combustão, que favorecem o craqueamento do alcatrão produzido na pirólise e a diminuição do conteúdo dos outros contaminantes.

Para o caso da composição dos gases principais, em especial o H_2, tem um leve aumento com o acréscimo da temperatura de redução e a relação ar. O teor de metano relacionado indiretamente com o conteúdo de alcatrão, é observado que diminui com o aumento da temperatura, como mostrado na Tabela VII.

A Figura 17 mostra o perfil de temperatura para Ra de 80%, sendo possível verificar a estabilidade das condições de combustão. Na Figura 18 é apresentada a variação do PCI do gás em função da vazão de ar.

Tabela VII – Resultados experimentais da caracterização do gás.

Parâmetro	Unidade	Resultados								
		Teste 1	**Teste 2**	**Teste 3**	**Teste 4**	**Teste 5**	**Teste 6**	**Teste 7**	**Teste 8**	**Teste 9**
Ra	(%)	0	0	0	40	40	40	80	80	80
Ar1	m^3/h	0	0	0	6.38	5.70	7.79	9.90	8.89	12.06
Ar2	m^3/h	22.18	24.57	26.93	15.99	14.30	19.53	12.38	11.11	15.09
Total	Nm^3/h	18	20	22	18	20	22	18	20	22
T pirólise	°C	543.64	603.08	600.42	587.03	633.64	671.76	696.39	691.80	740.05
T combustão	°C	569.74	645.98	710.44	754.75	751.14	792.38	776.89	783.22	870.23
T gaseificação	°C	526.87	510.71	587.65	567.94	568.49	695.18	518.76	571.09	655.52
H_2	% vol	14.62	17.71	15.41	14.88	16.61	16.91	15.38	17.14	16.56
CO	% vol	18.69	22.12	20.32	18.30	20.73	20.90	17.60	19.20	19.56
CH_4	% vol	1.72	1.71	1.87	2.05	1.86	1.82	1.38	1.34	1.28
CO_2	% vol	15.33	13.32	13.53	15.39	13.52	12.08	15.13	14.21	13.46
Alcatrão	mg/Nm^3	1269.70	418.95	179.86	76.09	104.99	78.57	171.49	54.09	99.61
Partículas	mg/Nm^3	216.45	146.04	176.04	142.39	107.16	164.99	97.19	22.69	292.2
HCl	mg/Nm^3	-	513.5	-	-	297.17	-	-	249.91	321.12
H_2S	mg/Nm^3	-	11.16	-	-	8.24	-	-	2.35	6.81

Figura 14 – Conteúdo de impurezas no gás. ar total 20 Nm^3/h.

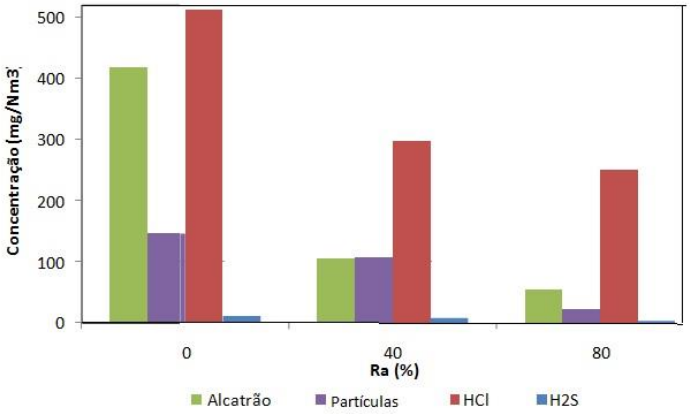


Figura 15 – Conteúdo de alcatrão e partículas em função da vazão de ar.

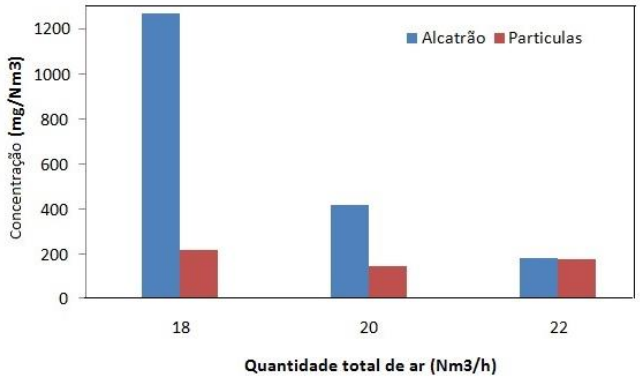


Figura 16 – Conteúdo de alcatrão e partículas em função da temperatura na zona de combustão.

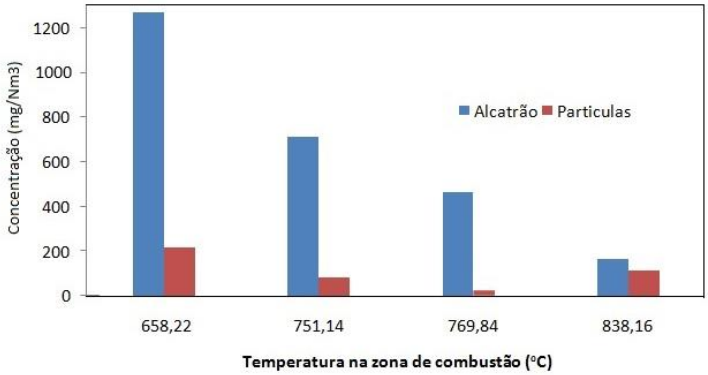


Figura 17 – Perfil de temperatura para o gaseificador para Ra=80%.

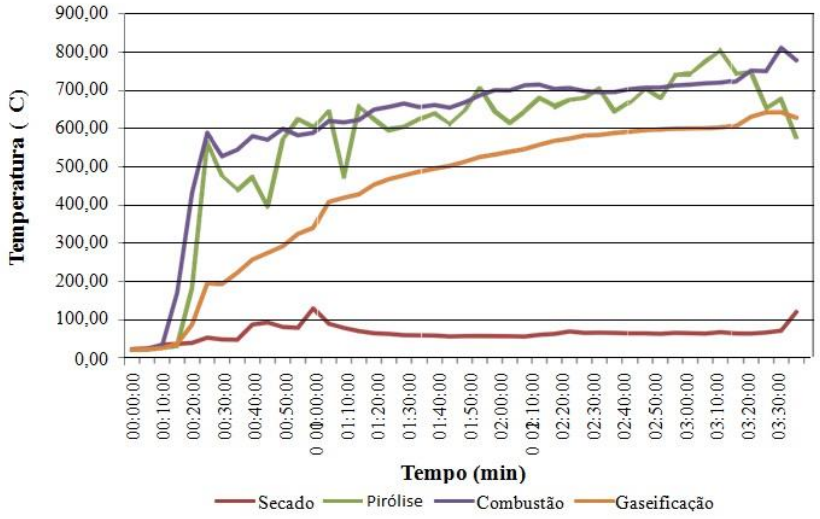
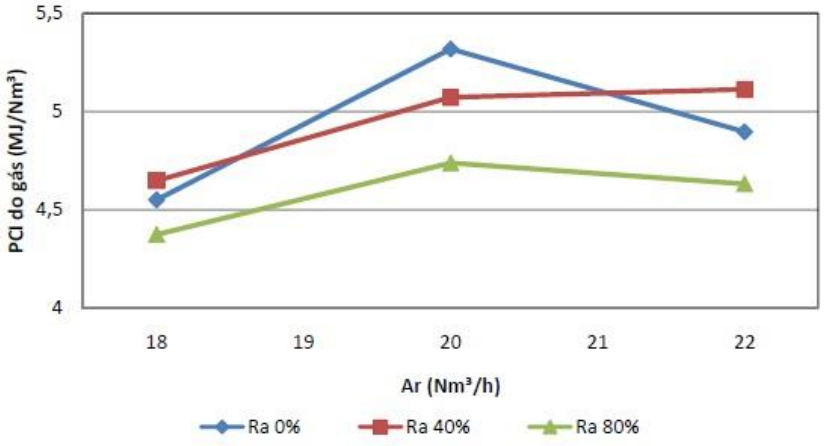


Figura 18 – PCI em função da vazão de ar.



Segundo [15], a implantação de gaseificadores co-corrente de duplo estágio favorece a produção de um gás com menor teor de alcatrão com acréscimo nas concentrações de CO e H_2 se comparado com o gaseificador co-corrente convencional. O duplo estágio favorece o aumento na temperatura da zona de pirólise e secagem, aumentando o craqueamento do alcatrão presente no gás produzido.

B. Operação do sistema de limpeza.

Na Tabela VIII são mostrados os resultados experimentais da operação do sistema de limpeza. O sistema de limpeza permite a remoção dos contaminantes presentes

no gás produto da gaseificação de biomassa, ate níveis acima de 90%, 80% e 50% para alcatrão e partículas, H_2S e HCl respectivamente. No entanto, para o caso do H_2S, a impureza mais problemática para a operação da SOFC, a porcentagem de remoção é suficiente para que o gás seja usado diretamente, sem problemas já que o valor mínimo atingido esta por baixo de 9 ppm [3]. No caso do HCl, o conteúdo poderia reduz se fosse utilizada uma solução básica como liquido de lavagem no *spray*. No entanto, o gás pode ser usado na SOFC mesmo com essa concentração, considerando que em concentrações abaixo de 200 ppm de HCl, podem não ter influencia significativa no desempenho da célula [31]-[33]. A seguir nas Figuras 19-20 são mostrados os resultados para a operação do sistema de limpeza.

Tabela VIII – Composição do gás durante a operação do gaseificador com sistema de limpeza.

Parâmetro	**Unidade**	**Antes**	**Depois do sistema de limpeza**				
			Teste 1	**Teste 2**	**Teste 3**	**Teste 4**	**Teste 5**
T reator	**°C**		50	150	25	25	25
T filtro			350	350	350	400	300
Venturi	**LPM**	-	4	4	4	4	4
Spray			3	3	3	2	4
Alcatrão		321,480	36,643	26,003	49,192	38,093	14,387
Partículas	**mg/Nm^3**	178,457	22,383	23,112	17,032	14,707	24,694
H_2S		37,881	5,918	3,830	7,267	8,721	7,509
HCl		337,245	134,772	171,615	123,930	195,608	127,822
Remoção Alcatrão			88,60%	91,91%	84,70%	88,15%	95,52%
Remoção Partículas	**%**	-	87,46%	87,05%	90,46%	91,76%	86,16%
Remoção H2S			84,38%	89,89%	80,82%	76,98%	80,18%
Remoção HCl			60,04%	49,11%	63,25%	42,00%	62,10%

Figura 19 – Operação do sistema de limpeza para HCl e NH_3.

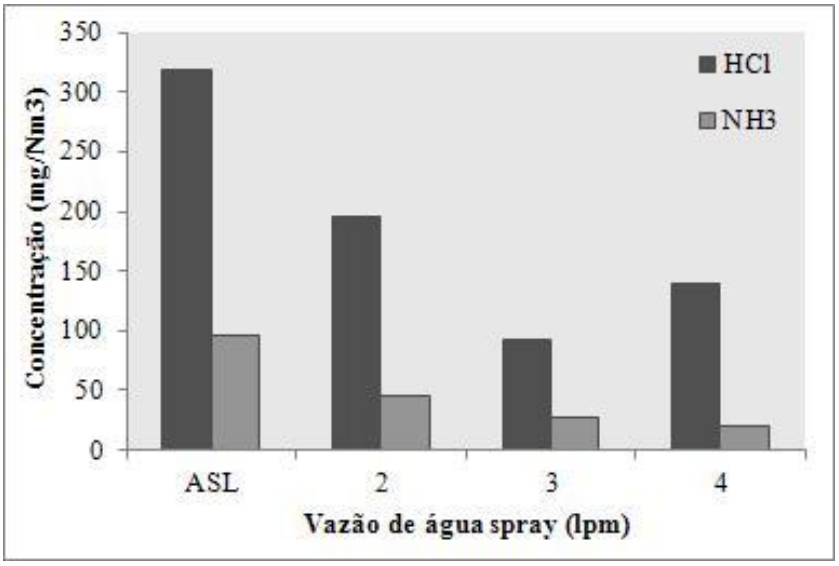
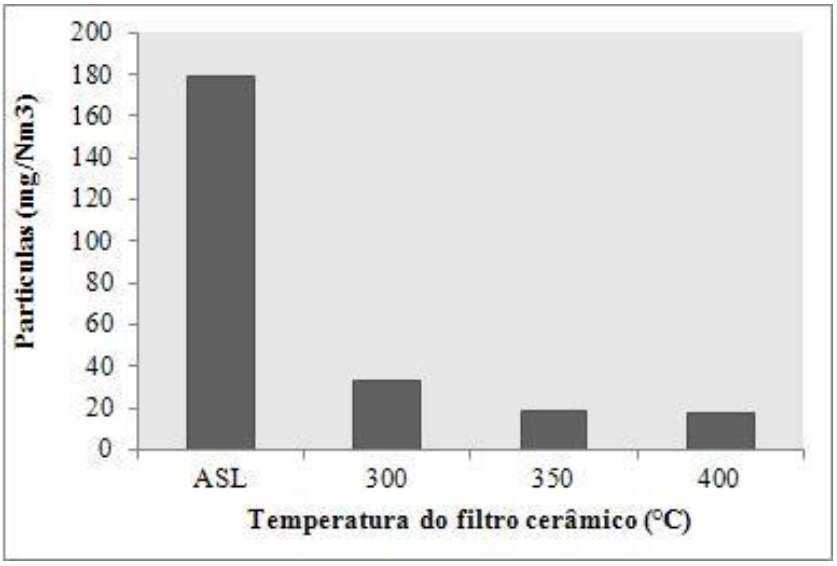


Figura 20 – Partículas em função da temperatura no filtro cerâmico.



De acordo com a Figura 19, a quantidade de água que é usada no lavador *spray* influencia a capacidade de remoção de HCl, assim, quanto maior for o fluxo de água usado menor é o conteúdo de ácido no gás, porem é necessário ter em conta que a metodologia de analise deste contaminante trata-se de uma adaptação sujeita a validação. Já no caso das partículas, a literatura disponível deste assunto, coincide

com os resultados em quanto que o aumento da temperatura de operação dos filtros cerâmicos favorece a retenção de material particulado nas velas [34]-[35].

O uso do duplo estágio de fornecimento de ar como método primário de conversão dos hidrocarbonetos pesados presentes no gás gerado é um método eficiente e econômico para a redução do conteúdo de alcatrão. No entanto deve ser usado como método preliminar no caso de aplicações muito exigentes como as SOFC.

O aumento na vazão de ar favorece a redução do enxofre e dos ácidos, porém acima de 20 Nm^3/h parece apresentar um aumento, no entanto, é necessário um estudo mais completo para poder concluir com exatidão este comportamento.

A operação do sistema de limpeza permite reduções até 95% para alcatrão, 90% para partículas, 89% para H_2S e 63% para HCl. Os valores máximos atingidos de 8 e 190 ppm, para H_2S e HCl respectivamente, permite o uso do gás na SOFC de acordo com estudos prévios disponíveis na literatura. Existe a necessidade de se aprofundar no estudo e análise dos resultados no sentido de se mapear o ponto ótimo de operação do sistema que permita obter um gás com a máxima composição de gases combustíveis e a mínima composição de impurezas.

É sugerido um estudo sobre o carvão ativado que permitam aumentar a eficiência de remoção de enxofre, mesmo como o uso de liquido de lavagem alcalino no lavador *spray* para aumentar a remoção dos compostos ácidos.

C. Integração gaseificador/sistema de limpeza/SOFC

A integração do sistema contendo: gaseificador, limpeza do gás e célula a combustível é a etapa mais complexa do projeto.

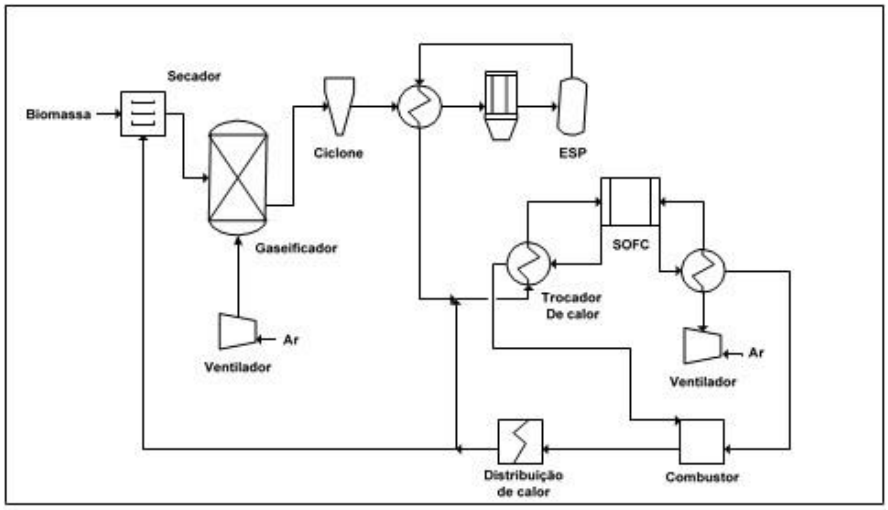
Para se operar a célula a combustível de forma continua com gás de gaseificação de biomassa será necessária a realização de outro projeto dada a complexidade e custos para esta atividade. Na Figura 21 é apresentado o esquema de conexão para o teste integrado.

D. Principais problemas

A seguir são listados alguns dos problemas vivenciados pela equipe ao longo da execução do projeto e principalmente dos testes finais:

- Formação de vácuos no interior do gaseificador devido a atolamento da biomassa no reator;
- Problemas com a pressão de água nos lavadores;
- Os bicos de aspersão não recebem a pressão suficiente para diminuir as gotas de água no tamanho certo;

Figura 21 – Esquema de conexão para teste integrado.



- O diâmetro do bico aspersor não gera gotas suficientemente pequenas o que diminui o contato entre o liquido de lavagem e os compostos contaminantes;
- A metodologia de amostragem e analise dos contaminan-tes são complicadas, precisam de longos tempos de trabalho e consumo de reagentes que são perigosos;
- A analise de HCl não é confiável, na amostra estão misturados outros compostos ácidos que reagem com a solução de álcali usada na amostragem;
- São necessários analisadores ou metodologias testadas e validadas confiáveis e seguras;
- Elevada demanda de água para a operação do sistema de purificação;
- Dificuldades de operação da célula a combustível SOFC.

31.4 Conclusões.

Foi desenvolvido neste projeto um sistema que permite o acoplamento de gaseificadores e células a combustível do tipo SOFC. O teste de conexão integrado do sistema, apesar de não ter sido realizado, baseado nos resultados obtidos pelo gás do sistema de gaseificação/sistema de limpeza possui requisitos que permitem o seu uso em células SOFC.

Através deste projeto foi possível desenvolver a tecnologia, principalmente associada com os sistemas de gaseificação de biomassa, demonstrando a sua viabilidade técnica.

A Cemig pode acompanhar o estado da arte da tecnologia, subsidiando o posicionamento estratégico e avaliando projetos na área. Ao final do projeto, percebe-se que o desenvolvimento tecnológico é de difícil evolução e de que um protótipo que de fato realize o que se propôs necessita ter novos desenvolvimentos e melhorias.

De qualquer forma, o projeto possibilitou a formação de recursos humanos, em nível de iniciação científica, mestrado e doutorado, reforçando a expertise do Núcleo de Excelência em Sistemas Térmicos (NEST/UNIFEI) nas tecnologias desenvolvidas neste projeto e contribuindo assim para que o centro se constitua e permaneça como referência no assunto. Além disso, foi possível a publicação científica e participação em fórum de discussão científica, promovendo a integração de pesquisadores e a sua atualização conceitual.

O benefício mais imediato do projeto é a disponibilização de infraestrutura e equipamentos na universidade, possibilitando formação e desenvolvimento tecnológico e continuidade da pesquisa associada com gaseificadores, sistema de limpeza e célula a combustível.

A equipe da Cemig obteve a transferência tecnológica em reuniões de acompanhamento, trabalhos e relatórios técnicos e pelo seminário de encerramento do projeto, onde todas as questões apresentadas neste artigo foram discutidas.

Com relação ao sistema de limpeza de gases e sua aplicação em SOFC, é possível listar as seguintes considerações:

- O uso do duplo como método primário para reduzir a produção de alcatrão no gás gerado é eficiente, permite reduzir até 87% e 71% o conteúdo de alcatrão e partículas respectivamente. No entanto, deve ser usado com método preliminar no caso de aplicações muito exigentes como as SOFC;
- Com vazões de ar de 20 Nm^3/min e Ra 80%, é possível obter um gás de síntese com alto conteúdo de H_2 e CO e baixo conteúdo de alcatrão, partículas, H_2S e HCl. No entanto, é necessária uma avaliação mais completa em especial para H_2S e HCl, os quais foram analisados só em 4 testes;
- Foi difícil a reprodutibilidade dos resultados. As concentrações dos contaminantes e dos gases dependem da biomassa e da temperatura no interior do gaseificador e mesmo controlando a quantidade do ar que entra no sistema, as temperaturas podem variar no interior devido a outros fatores que não são controlados (formação de espaços mortos dentro do reator, uniformidade na umidade da mesma, condições ambientais);
- A operação do sistema de limpeza permite reduções dos contaminantes acima de 90%, para alcatrão, H_2S e partículas, 70% para HCl e 81% para NH_3. Os valores máximos de 8 e 195 mg/Nm3 para H_2S e HCl respetivamente permitem o uso do gás na SOFC;

- É necessária uma pesquisa mais completa para determinar a condição ótima de operação que permita obter um gás com a máxima composição de gases combustíveis e a mínima composição de contaminantes. É sugerido o estudo de carvão ativado com compostos básicos que permitam aumentar a eficiência de remoção de enxofre, mesmo como o uso de liquido de lavagem alcalino no lavador *spray* para aumentar a remoção dos compostos ácidos;
- Assim mesmo sugere-se a caracterização completa do gás, para determinar compostos principais e contaminantes usando técnicas analíticas e/o equipamentos de analise testados e validados, que permitam ter certeza nos dados obtidos, especialmente no caso de HCl.

Como sugestão para pesquisas futuras indica-se a melhoria das questões de conexão e também um teste de longa duração usando o sistema SOFC.

Capítulo 32

Capítulo 32: Aerogeradores de Pequeno Porte Adaptados a regimes de ventos turbulentos e conectáveis em redes elétricas fracas[32]

***Resumo*- Este informe técnico apresenta as motivações para o desenvolvimento de tecnologia nacional em aerogeradores de pequeno porte, bem como apresenta os resultados parciais do desenvolvimento de um protótipo de 10 kW. Através de uma abordagem resumida, são descritos os principais passos do projeto, salientando-se as razões e implicações das decisões tomadas. Sem esgotar o assunto, são delineados os passos realizados e futuros para atingir o objetivo de transformar o protótipo em produto comercial e viabilizar seu uso como alternativa de geração para localidades remotas desprovidas de rede elétrica ou conectadas a sistemas elétricos fracos.**

32.1 Introdução

O acesso às fontes modernas de energia é um dos principais indicadores de desenvolvimento de um povo. O acertado processo de universalização do uso de energia elétrica constitui um desafio às concessionárias do setor, que precisam prover as mais competitivas soluções para o provimento de energia a consumidores remotos. Em regiões como o Norte de Minas Gerais, onde a densidade populacional e o consumo específico de energia são baixos, esta questão se agrava, uma vez que o provimento via rede convencional assume custos elevados. Na CEMIG, um portifólio de opções de geração local, tradicionais e alternativas, é confrontado a opções de conexão ou expansão da rede. Um exemplo de sucesso é o programa existente na empresa de universalização do acesso à energia a escolas e residências rurais por meio de sistemas fotovoltaicos.

Aerogeradores de pequeno porte são alternativas comerciais para provimento de energia renovável em localidades remotas. Além daqueles que podem operar em sistemas isolados ou híbridos, alguns geradores de pequeno porte podem atuar em redes fracas, fornecendo potência ativa bem como regulação de tensão, minimizando distúrbios aos consumidores e agregando robustez que a faça suportar desequilíbrios, variações de tensão, tensões induzidas, entre outros distúrbios característicos de redes rurais.

A maioria dos pequenos aerogeradores disponíveis no mercado nacional, importados na quase totalidade, não são providos de elementos que os permitam atender plenamente aos quesitos de melhoria da qualidade da energia, além de não terem sido desenvolvidos para os regimes de ventos típicos do interior do território brasi-

[32] LOPES, B. M.; LISBOA, A. H.; CARVALHO, A. M.; MASCIMENTO, C. A. M. do; BORTOLUS, M. V.; VALLE, R. M.; PINTO, R. L. U. de F.; RIBEIRO, R. P.; SILVA, S. R.; VASCONCELOS, J. A. de. Publicado em XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009, Recife/PE.

leiro, caracterizados por alta turbulência aerodinâmica, devida à topografia complexa, sendo responsáveis pela redução do desempenho e da vida útil dos aerogeradores.

Adicionado à questão de adaptabilidade das turbinas ao regime turbulento dos ventos, a necessidade do conhecimento sistemático das características dos últimos, impõe a criação de uma metodologia de estimação de velocidades de ventos a baixas alturas (típicas para turbinas de pequeno porte), onde o relevo e a rugosidade superficial têm significativa relevância.

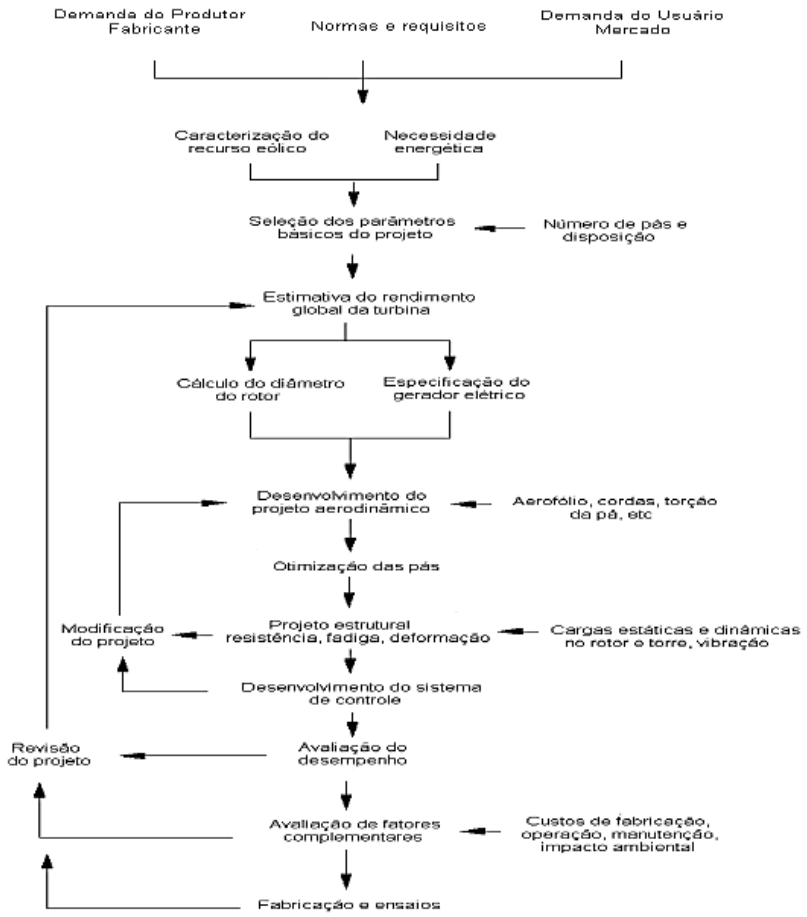
Nesse contexto, está sendo conduzido, por meio de parceria entre a Cemig e a UFMG, o projeto "Desenvolvimento de Centrais Eólicas Adaptadas às Condições de Vento do Estado de Minas Gerais" (1), que tem como principais objetivos: a caracterização do regime de ventos em terrenos complexos para fins de desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte; o desenvolvimento de uma turbina eólica de 10 kW de baixo custo e alta eficiência, adaptada aos regimes de vento em terrenos complexos; e o desenvolvimento de um sistema de geração, adequado para acionamento direto por turbina eólica de baixa potência, para conexão com redes elétricas de distribuição.

Propõe-se, no presente, apresentar os resultados parciais do projeto, trazendo as metodologias desenvolvidas, os principais avanços e resultados alcançados, bem como os desafios a serem suplantados.

32.2 Metodologia do Projeto da Turbina Eólica

Turbinas eólicas são equipamentos mecânicos complexos que exigem ampla gama de conhecimentos em seu projeto global, que é realizado em um processo iterativo em que estimativas preliminares são continuamente confirmadas ou modificadas em função de etapas subseqüentes. A Figura 1 apresenta a estrutura básica da metodologia aplicada.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de projeto.



A. Especificação preliminar e filosofia de projeto

Em uma fase preliminar, define-se o desempenho almejado e o regime de ventos "alvo", bem como se levanta o arcabouço normativo, de modo que o produto final seja passível de certificação. A *International Electrotechnical Commission* – IEC possui um conjunto de normas (em processo de adoção pela ABNT) referentes ao projeto, fabricação e utilização de equipamentos de geração eólico-elétrica agrupados sob a referência geral IEC 61400. Em suas diversas partes, esta norma trata de requisitos gerais de projetos de aerogeradores, turbinas de pequeno porte, técnicas de mensuração de ruído acústico, teste de desempenho de turbinas, qualidade da energia, proteção contra descargas atmosféricas, dentre outros. De fundamental importância são os critérios da IEC 61400 relativos a regime de ventos críticos e carregamentos aerodinâmicos, operacionais, gravitacionais e inerciais.

Com relação ao regime de ventos, vale ressaltar que o projeto da turbina é fortemente dependente da distribuição anual de ventos da localidade que se pretende instalar o aerogerador. Em projetos de turbinas de pequeno porte, esta realidade se mantém, mas destaca-se o fato de que não é economicamente interessante personalizar cada equipamento a uma condição específica ou até mesmo conhecer profundamente o regime de ventos dos diversos locais de instalação. Então, faz-se necessário o conhecimento das características de uma região e não propriamente de um sítio. Sacrifica-se parcialmente a eficiência local em benefício da global. No contexto desse projeto, busca-se avaliar o regime de ventos típicos das regiões propícias do Estado de Minas Gerais, caracterizadas por relevo acidentado e velocidades de vento moderadas, e que possuem semelhanças com grande parte do interior brasileiro. O item 4 apresenta a metodologia empregada para obtenção dessas informações.

Outra característica importante a ser considerada é a turbulência, definida como a razão entre a variância da velocidade do vento e sua velocidade média. Em regiões montanhosas o regime dos ventos tende a ser mais turbulento, especialmente a baixas alturas, onde são instalados geradores de pequeno porte. A quantificação dessa característica permite melhor desempenho e maior longevidade dos sistemas projetados.

Uma vez que se objetiva o desenvolvimento de tecnologia nacional de aerogeradores de pequeno porte, que seja competitiva economicamente e adaptada às condições locais, serão utilizados materiais e componentes de fácil disponibilidade em nosso mercado, sendo também almejado simplicidade construtiva e baixos custos de fabricação, instalação e manutenção.

B. Projeto Conceitual e Preliminar

Entende-se por projeto conceitual um conjunto de escolhas dentre alternativas possíveis, ainda que nenhum cálculo completo tenha sido feito. Há nesta etapa um balanço entre soluções inovadoras e consagradas, que depende da experiência dos projetistas e do grau de risco a ser assumido. O projeto conceitual baseia-se no conhecimento de características genéricas das alternativas, nas suas evoluções históricas e tendências, e na oportunidade de desenvolver tecnologias de ruptura. No contexto do projeto do sistema eólico fazem parte do projeto conceitual a decisão entre rotores de eixo vertical ou horizontal, do posicionamento das pás a montante ou a jusante do vento, do sistema de alinhamento do rotor com o vento, da operação a velocidade constante ou variável, da existência ou não de caixa de multiplicação, do tipo de gerador elétrico, da existência e topologia de conversores estáticos, dentre outros.

Foi selecionada para este trabalho a configuração básica com emprego de eixo horizontal, adotada por todos os fabricantes de sistemas de grande porte e pela maioria dos fabricantes de sistemas de pequeno e médio porte. Análises comparativas entre turbinas de eixo vertical e horizontal podem ser obtidas em (2) e (3). Quanto à posição do rotor em relação à torre, há uma clara tendência de opção pela confi-

guração *upwind* (rotor a montante do vento), caracterizado por menor ruído, fadiga das pás e pulsação de potência. No que diz respeito ao número de pás, diversas características técnicas convergem para o uso de três elementos em sistemas de geração eólico-elétrica. Maiores detalhes podem ser obtidos em (4), (5) e (6).

Com relação ao controle de passo, este permite que a turbina trabalhe em regime de rendimento ótimo para cada faixa de velocidade, além de permitir o controle ativo de potência, facilitar a partida da máquina, reduzir o peso do rotor, dispensar o uso de fortes freios de parada de emergência, entre outros (7). No entanto, constitui-se normalmente de um sistema de regulagem ativo que onera o projeto. Para a faixa de potência nominal de 10 a 20 kW, alguns fabricantes têm optado por turbinas de variação passiva do passo através da deformação das pás sob carregamentos aerodinâmicos e inerciais, solução que está sendo buscada nesse projeto.

Uma atenção especial deve ser dada à seleção dos materiais a serem utilizados na fabricação dos componentes estruturais dos rotores eólicos, que devem, além de atender critérios de resistência, rigidez e resistência à fadiga, contemplar compromissos de custo, facilidade de fabricação e manutenção, confiabilidade e segurança operacional. A maioria das turbinas eólicas utiliza, em sua construção, plástico reforçado com fibra de vidro, plástico reforçado com fibra de carbono, aço ou madeira (8). Além de atender aos quesitos citados, o uso da madeira se justifica pela ampla experiência da equipe do projeto na construção de perfis aerodinâmicos utilizando esse material.

No presente momento, a equipe de pesquisa concluiu todos os passos do projeto da turbina, cuja construção se inicia. O equacionamento e os modelos empregados possuem nível de complexidade que foge ao escopo desse informe e, portanto foram omitidos. As especificações básicas são apresentadas na seção 5.

32.3 Determinação do Sistema de Geração Elétrica

Entende-se como sistema de geração elétrica, no contexto desse artigo, o conjunto do gerador elétrico e dos conversores estáticos que promovem a adequação da energia elétrica gerada nos terminais desse gerador com a energia demandada. A Figura 2 (9) apresenta exemplos de arquiteturas clássicas de sistemas eólicos conectados à rede, aplicação foco do projeto. A determinação do sistema adequado é função de uma série de fatores, onde se destacam as características de amortecimento, a capacidade de provimento de energia reativa, a resposta dinâmica frente a curtos-circuitos, a robustez de sua construção, as dificuldades de sincronismo com a rede, o aproveitamento energético e os custos de aquisição e operação.

Existem sistemas de conversão de energia eólica que operam a velocidade constante (ex. Figuras 2 – a, d) e sistemas que operam a velocidade variável (ex. Figuras 2 – b, c, e). Os primeiros estão em franco desuso, devido ao restrito aproveitamento energético, dentre outros inconvenientes. Ainda muito utilizada, a arquitetura da Figura 2 – f, permite uma excursão limitada a cerca de ± 30% em torno da velocidade nominal, restringindo sua capacidade de otimização energéti-

ca. A menor potência aparente dos conversores estáticos (30 % a 40 % da potência nominal da máquina) torna o custo desse tipo de máquina competitivo. Tal vantagem diminui ou se inverte com a redução dos níveis de potência do aerogerador, devido à redução dos custos dos elementos semicondutores, sendo esta também uma tendência para máquinas de grande porte.

Do ponto de vista construtivo, os sistemas de geração elétrica se diferenciam quanto à presença de caixa de multiplicação, presença de conversores estáticos no circuito de potência e/ou de campo, tipo e características construtivas dos geradores. Naturalmente, a escolha desses elementos é interdependente e deve atender aos quesitos já citados.

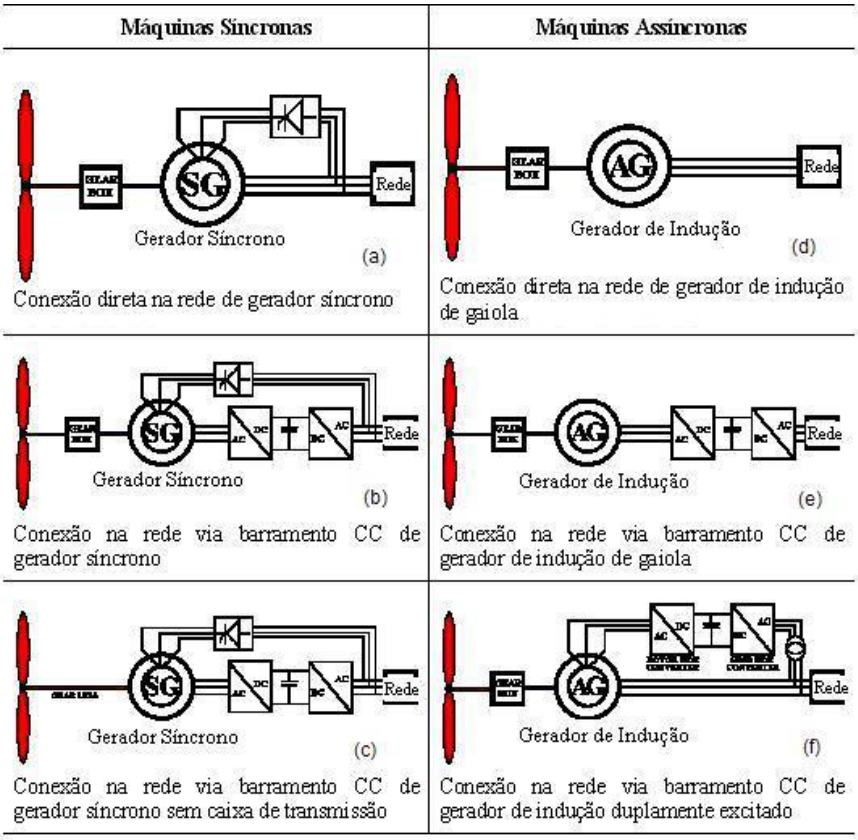
As turbinas eólicas operam em baixas rotações, da ordem de 0,25 a 2,5 rotações por segundo. Três estratégias (não necessariamente mutuamente excludentes) podem ser utilizadas de modo a compatibilizá-las com a freqüência da rede: utilização de caixa de multiplicação, utilização de gerador de grande número de pólos ou conversão em baixa frequência. Historicamente, optou-se pela primeira alternativa, que embora possua eficiência relativamente menor e maior demanda de manutenção, configurava um baixo custo global para o equipamento, além de permitir que os fabricantes de aerogeradores integrassem geradores comerciais aos seus produtos sem participar do desenvolvimento dos mesmos. Nesse projeto, optou-se pela utilização da combinação do gerador de maior número de pólos com conversão em baixa freqüência, acompanhando a tendência de desenvolvimento atual. Ilustrando esta tendência, a CEMIG possui, juntamente com a empresa argentina Impsa, um parque gerador de quase 100 MW formado por aerogeradores de 1,5 MW de tecnologia alemã *Vensys*, que fazem uso dessa estratégia. Como benefícios podem ser citados a simplificação do projeto da nacele e a redução de paradas e custos de manutenção.

Realizada a opção por geradores de acionamento direto, foi analisada a questão sobre a escolha entre geradores síncronos a excitação elétrica ou a ímãs permanentes. Apesar de serem mais caros, os segundos eliminam as perdas da bobina de excitação e são menores, além de eliminarem anéis e escovas de contato e circuitos auxiliares, passiveis de falhas e manutenção. Ademais, o controle da excitação do gerador não se constitui uma vantagem relevante quando se utiliza conversores estáticos no circuito de potência. Para esse projeto optou-se pela adoção do imã permanente para excitação do gerador elétrico.

Uma característica marcante das máquinas a ímãs permanentes é a grande flexibilidade dos projetos, uma vez que estes podem possuir diversos formatos e tamanhos e alocados em diferentes posições e orientações. A Figura 3 – a, apresenta a mais marcante diferenciação entre os diversos projetos: a orientação do fluxo do entreferro, podendo ser este radial ou axial. A maioria dos projetos existentes usa a primeira configuração. Esta, no entanto, possui menor densidade de potência (potência por volume e por massa) que as de fluxo axial, que ainda possuem como vantagem a possibilidade de modularidade, de ajuste de entreferro, e de maior número de pólos (melhor para baixas velocidades de rotação). Em (10), são com-

paradas diversas topologias de máquinas de fluxo axial e radial por meio de várias figuras de mérito: relação conjugado/peso e conjugado/volume, peso dos ímãs permanentes, do material ferromagnético e do cobre, comprimento e raio externo, volume e eficiência. Não existe genericamente uma melhor configuração, sendo esta dependente, dentre outros, de aspectos construtivos, preço dos materiais e requisitos de desempenho. Para este projeto, uma topologia se destacou: máquina de fluxo axial com duplo rotor externo (Figura 3 - b). Atualmente tal máquina está sendo projetada em um processo interativo com as características das turbinas e do conversor estático. Formulações analíticas permitem o traçado básico do equipamento, que é então modelado e otimizado via *software* de simulação eletromagnética *ANSYS Workbench* 11.0, baseado em técnicas de elementos finitos. O detalhamento desse desenvolvimento foge ao escopo desse informe.

Figura 2 – Arquiteturas clássicas de sistemas eólicos conectados à rede.



Com relação ao material do imã permanente, optou-se por aqueles de terras raras, especificamente o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) sinterizado, devido à sua alta densidade de fluxo remanente e força coercitiva, alto nível de energia e curva de desmagnetização linear. Tais ímãs possuem grande potencial de aprimoramento

tecnológico, além de custos decrescentes o que torna esta alternativa a mais promissora em todos os desenvolvimentos de máquinas elétricas a ímãs permanentes.

Para a interface com a rede, optou-se pelo uso de um conversor estático composto por retificador e inversor trifásico chaveado a IGBTs (do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Através de mecanismos de controle apropriados, esta topologia permite melhor interação do gerador com redes "fracas" (com baixa potência de curto-circuito), uma vez que permite entrega máxima de energia à rede, além de poder realizar compensações de potência reativa e minimizar distúrbios tais como flutuações de tensão, harmônicos e desequilíbrios de fase, melhorando a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

32.4 Caracterização do Regime de Ventos

Existem algumas diferenças de paradigmas entre a geração eólica de grande e pequeno porte. Os primeiros visam geração em escala para atendimento convencional ao sistema elétrico e, portanto, devem ser competitivos (mesmo que com alguma forma de incentivo ou subsídio) com outras formas de geração em escala. Regra geral, empreendimentos só são viabilizados em sítios cuja velocidade média de ventos seja elevada, acima de 7 m/s. De modo a garantir a sanidade financeira do investimento, é necessário conhecer profundamente o regime de ventos do sítio, realizado através de medições no local por pelo menos 1 ano e ainda cruzar informações com dados plurianuais de estações anemométricas próximas. As regiões propícias são preliminarmente conhecidas através de atlas de potencial eólico que, no caso do brasileiro, traz velocidades de ventos a 50 metros de altura e resolução espacial de 1 km (11).

Figura 3 – Orientações de fluxo (a) e máquina de fluxo axial com duplo rotor (b).

No caso do sistema de pequeno porte, pretende-se atender a demandas específicas, normalmente cargas afastadas da rede convencional ou reforços à rede em ponta de linha em sistemas rurais. O gerador eólico entra como potencial solução, assim como sistemas fotovoltaicos ou de geração a diesel, todos de alto custo, mas em alguns casos atrativos frente a reforços ou implantação de linhas. Neste contexto, viabiliza-se instalações em locais com velocidades de ventos não tão favoráveis, da ordem de 5 a 7 m/s. Por outro lado, não se pode despender tempo e recursos financeiros elevados com medições do regime de ventos em locais específicos, o que inviabilizaria a solução. As baixas alturas de instalação de geradores de pe-

queno porte possuem como característica um regime mais turbulento de ventos e uma variação espacial mais acentuada que em alturas elevadas, de modo que o uso direto da informação de atlas existentes não é possível.

Idealmente, para o uso de aerogeradores de pequeno porte como solução ótima, faz-se necessário o conhecimento prévio das regiões onde há regime de ventos favorável a esta solução. Isso seria conseguido através de um atlas para baixas altitudes, com resolução espacial refinada. Levantada a demanda de uma geração local, medições locais de curta duração associadas a técnicas de extrapolação temporal e espacial trariam informações sobre o melhor ponto de instalação. Esta abordagem, embora não esteja explícita no escopo do projeto, constitui um próximo passo a ser dado pela equipe, que no momento busca a solução para uma questão afim: qual o(s) regime(s) de ventos característico(s) de uma localidade propícia e típica do interior do país? Naturalmente a resposta a esta questão atende tanto à demanda para projeto das turbinas quanto sinaliza a metodologia para definição dos locais de instalação.

Está em curso a modelagem de uma região denominada Acuruí que atende à demanda relatada, e envolve territórios dos municípios de Itabirito, Ouro Preto, Rio Acima e Nova Lima, na região central do Estado de Minas Gerais. Esta região foi equipada com instrumentos de modo que os dados medidos podem ser utilizados para alimentação e/ou validação do modelo. A Figura 4 – a, apresenta a representação do relevo da região, juntamente com os pontos de medição de velocidade do vento (1 a 6, L, M, H). Os pontos L, M e H são estratégicos para análise tendo, respectivamente, baixa, média e alta altura. A Figura 4 – b apresenta o perfil de rugosidade, extraído através das tonalidades de cores de fotos de satélite. Tais informações, juntamente com dados de velocidade obtida por medição em pontos específicos ou nos contornos, obtidas por atlas, permitem a obtenção do perfil da velocidade dos ventos tanto ao longo do terreno (Figuras 4 – c, d), quanto em função da altura (Figura 4 - e). Destaca-se a intensa variação espacial da velocidade do vento, bem como a complexidade do perfil de velocidades em função da altura, o que denota a importância do procedimento de simulação.

No presente, o modelo está sendo refinado, com a inclusão de alguns fenômenos físicos secundários. Caracterizado o regime de ventos dessa região, incluindo valores médios e turbulência, os parâmetros são disponibilizados para refinamento do projeto da turbina. Os detalhes sobre o modelo desenvolvido fogem ao escopo desse trabalho.

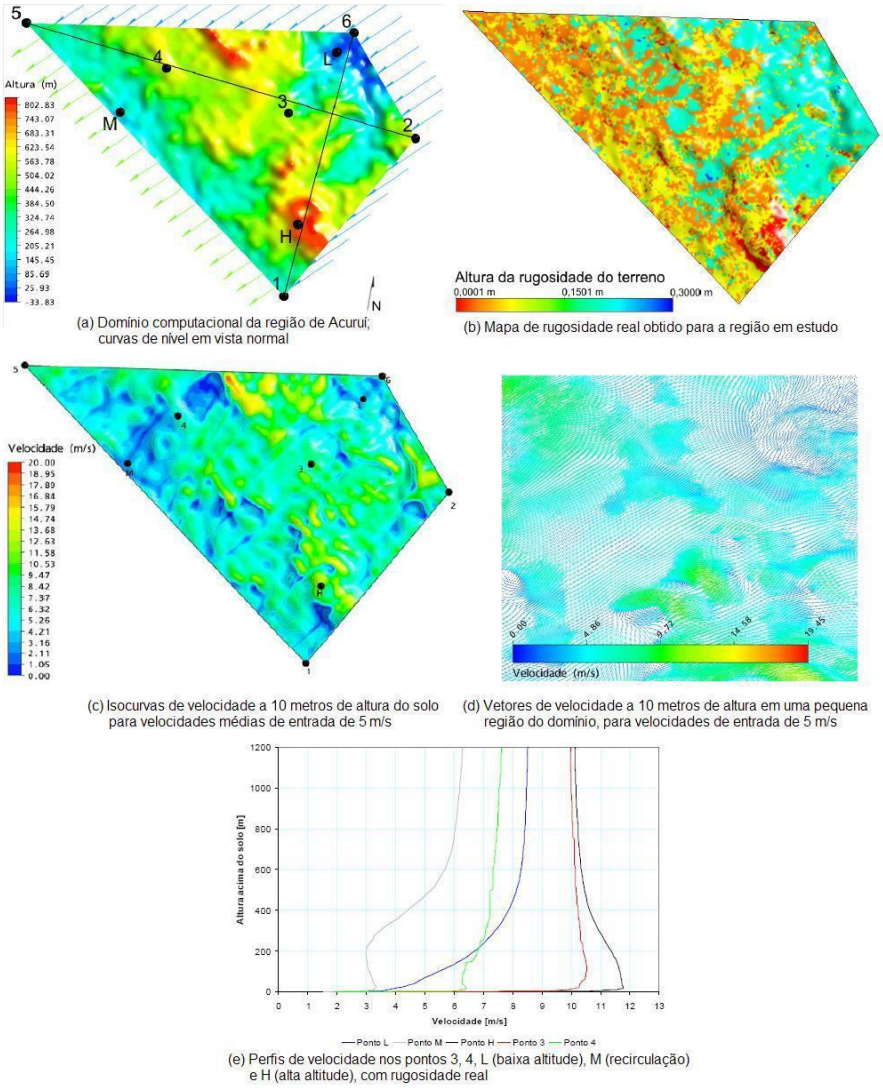
32.5 Especificação Básica do Protótipo

Segue a descrição básica do protótipo, com dados técnicos, ressalvando o caráter preliminar:

- Rotor eólico: eixo horizontal, *upwind*, com três pás em madeira, passo ajustável e controle passivo de guinada, diâmetro de 7 m, potência nominal de 10 kW, vento nominal de 10 m/s, rotação nominal de 191 rpm, perfil aerodinâmi-

co NACA 23015, sistema de proteção do tipo passivo com desalinhamento automático da direção do vento (auto furl) para velocidade de 18 m/s, velocidade de sobrevivência de 30 m/s, altura de torre entre 12 e 18 m;

Figura 4 – Caracterização do regime de ventos de uma localidade.



(a) Domínio computacional da região de Acuruí; curvas de nível em vista normal

(b) Mapa de rugosidade real obtido para a região em estudo

(c) Isocurvas de velocidade a 10 metros de altura do solo para velocidades médias de entrada de 5 m/s

(d) Vetores de velocidade a 10 metros de altura em uma pequena região do domínio, para velocidades de entrada de 5 m/s

(e) Perfis de velocidade nos pontos 3, 4, L (baixa altitude), M (recirculação) e H (alta altitude), com rugosidade real

- Gerador elétrico: trifásico a ímãs permanentes de fluxo axial, com estator interno e duplo rotor externo, com ímãs de terras raras (Nd-Fe-B) grau 45 H, distribuição de densidade de fluxo achatada, enrolamento concentrado, estator com 48 bobinas, frequência nominal de 25,5 Hz, 16 pólos e 92% de eficiência;

- Sistema de conversão: retificador e inversor trifásico chaveado a IGBTs de 12 kVA, com tensão de saída de 220 V / 60 Hz e tensão de entrada variável em amplitude e frequência, barramento CC a 400V.

32.6 Conclusões

O presente trabalho apresentou as linhas gerais do projeto de um protótipo de um gerador éolico de pequeno porte. Destacam-se não só pelo caráter inovador, mas pelo potencial de competitividade:

- Projeto e construção de gerador de fluxo axial, que se caracteriza por maior densidade energética e consequente redução de massa e volume em relação ao gerador convencional (fluxo radial);
- Técnicas de projeto fundamentadas em modelagens analíticas que permitem maior controle de parâmetros e redução de empirismo;
- Foco em sistemas interligados à rede fraca, com possibilidade de injeção de potência ativa e reativa e capacidade de regulação de tensão;
- Conhecimento dos impactos das turbulência sobre o desempenho e longevidade dos aerogeradores, o que permitirá melhorias operacionais e construtivas.

A integração das equipes de pesquisa da UFMG com técnicos da CEMIG tem permitido um bom equilíbrio entre desafios acadêmicos, essenciais para o desenvolvimento de tecnologia de ponta, e empresariais, com foco na viabilização técnico-econômica do produto. Pretende-se, ainda em 2009, ter um protótipo totalmente funcional, construído e instalado. Este balizará o desenvolvimento de novos modelos, ainda no âmbito desse projeto de pesquisa.

O modelo de camada limite atmosférica, cujo desenvolvimento foi iniciado em 2003 (12) e que vem sendo desenvolvido em (13) e no escopo do projeto (1), viabilizará em etapa futura a geração de Atlas Eólico em baixa altura, que por sua vez permitirá, juntamente com informações de demanda de energia e o georeferenciamento do sistema elétrico, definir os locais de maior viabilidade para implantação de tais sistemas.

REFERÊNCIAS

Referências

Capítulo 1

[1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa Nº 673**, de 4 de Agosto de 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.

[2] AMARANTE, O. A. C. do. *et al*. **Atlas eólico:** Minas Gerais / Odilon A. Camargo do Amarante, Fabiano de Jesus Lima da Silva, Paulo Emiliano Piá de Andrade. – Belo Horizonte, MG : Cemig, 2010.

[3] AMBIENTE ENERGIA. **Brasil ocupa 4º lugar no ranking de produção de energia renovável.** Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/01/brasil-ocupa-4o-lugar-ranking-de-producao-de-energia-renovavel/25112>. Acesso em: 02 set. 2016.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEOLICA. **Desafio é melhorar transmissão e logística**. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/2153-desafio-%C3%A9-melhorar-transmiss%C3%A3o-e-log%C3%ADstica.html>. Acesso em 06 mar. 2016.

[5] BARACHO, F. R. A. C. et al. Implantação de Fontes Alternativas de Energia Usando a Gestão da Informação para Apoio ao Processo de Decisão. In: **Congresso em Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

[6] BARCELOS, D. C. et al. **Tecnologias Integradas de Transporte de Gás de Carbonização de Biomassa e Beneficiamento de Subprodutos para Cogeração de Energia Elétrica Usando Microturbinas**. 2013.

[7] BRASIL. **Lei Nº 9.991**, de 24 de Julho de 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9991.htm>. Acesso em: 05 set. 2016.

[8] CARNEIRO, A. C. O. et al. Desempenho de um Sistema Industrial de Transporte de Gases da Carbonização para a Cogeração de Energia Elétrica. In: **Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

[9] CARNEIRO, A.C. O. et al. **Potencial dos Resíduos da Colheita Florestal e Resíduos da Carbonização para a Produção de Energia.** Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2015, Costa do Sauípe/BA. VIII Citenel, 2015.

[10] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

[11] _____. Alternativas Energéticas: uma visão Cemig. Belo Horizonte: Cemig, 2012a.

[12] _____. Rede Nacional De Biomassa Par A Energia. Avaliação de densidade de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para produção de biomassa. Belo Horizonte: CEMIG, 2009.

[13] _____. O Programa de P&D. Belo Horizonte: CEMIG, 2013. Disponível em: < http://cemignet20/inovacao/pesquisa_e_desenvolvimento/Pages/o_programa_de_PD.aspx>. Acesso em: 05 set. 2016.

[14] COSTA, R. C. DA & PRATES, C. P. T..O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar. 2005. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2436>. Acesso em: 02 set. 2016.

[15] CUSTÓDIO, R. dos S.. Energia eólica/Ronaldo dos santos Custódio. – 2ª ed. Ver. E ampl. – Rio de Janeiro: Synergia: Acta: Abeeólica 2013.

[16] DINIZ, J. H. et al. Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico. In: **Congresso em Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2001, Brasília. I Citenel, 2001.

[17] DUKE ENERGY. **UHE E PCH**. Junho/2015. Disponível em: <http://www.duke-energy.com.br/usinas/Paginas/UHE-e-PCH.aspx>. Acesso em: 06 set. 2016.

[18] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional 2015** / Relatório Síntese / Ano base 2014 – Rio de Janeiro: EPE, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2015_Web.pdf>. Acesso em 29 de fev. 2015.

[19] _____. **Balanço Energético Nacional 2016:** Ano base 2015 – Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=2015 >. Acesso em 05 de set. 2016.

[20] _____. **Balanço Energético Nacional 2016:** Ano base 2015 – Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=2015>. Acesso em 05 de set. 2016.

[21] FERREIRA, C. J. N. **Geopolítica do Brasil –** A consolidação de uma Potência Regional e o despontar de uma Superpotência Emergente (1995 – 2010). Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Estratégia. Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas. Universidade Lisboa. Lisboa, 2014. Disponível em: <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/7916/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20de%20mestrado.pdf>. Acesso em: 02 set. 2016.

[22] FERREIRA, A. G., et al. **Otimização da Eficiência Elétrica de Módulos Fotovoltaicos Através do Acoplamento de Trocadores de Calor Tipo Tubo-Aleta.** Publicado em VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Citenel, 2015, Sauipe/Bahia.

[23] INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Procedimentos de licenciamento ambiental para implantação de Empreendimentos Hidrelétricos no Paraná**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/Procedimentos_LicenciamentoAmbiental_EHS.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.

[24] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapas**. Disponível em: < http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 02 set. 2016.

[25] LEME, M. M. V, et al.. Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: abordagem econômica e ambiental. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica** da Aneel, 2011, Fortaleza. VI CITENEL, 2011.

[26] LOPES, B. M. et al. **Aerogeradores de Pequeno Porte Adaptados a regimes de ventos turbulentos e conectáveis em redes elétricas fracas**. Publicado em XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009, Recife/PE.

[27] MADUREIRA, A. J. V., et al.. Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[28] MENDES, M. I. S. ; et al.. ESTUDO SOBRE BALANÇO ENERGÉTICO. **Revista SODEBRAS**, v. 102, p. 6471, 2014.

[29] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME & EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>. Acesso em 05 de set. 2016.

[30] OLIVEIRA, R.L.; RIBEIRO, V. M.; PASSOS, F. B.. Potenciais Tecnologias de Produção de Hidrogênio a partir da Biomassa. Perspectivas online: exatas & eng, Campos dos Goytacazes, 10 (04), 12-25, 2014. Disponível em: <http://www.perspectivasonline.com.br/ojs/index.php/exatas_e_engenharia/article/view/523/499>. Acesso em: 06 set. 2016.

[31] PEREIRA, E. M. D., et al.. Geração Termelétrica Descentralizada para o Setor Siderúrgico. In: VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[32] REIS, L. B. dos. Geração de Energia Elétrica. Editora Manole, 2015. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang_es|lang_en|lang_pt&id=YpgDCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=vantagens+e+desvantagens+energia+hidr%C3%A1ulica&ots=2NcpPg8_GV&sig=JtxCME2supI0OS7qYj5GjO8seYo#v=snippet&q=hidr%C3%A1ulica&f=false>. Acesso em: 05 set. 2016.

[33] SHERIF, S. A. et al. Hydrogen Energy Technologies. In: **Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy.** KREITH, F. & GOSWAMI, D. Y. (Ed.). 2007.

[34] SILVA, C. H. F. et al.. MICROTURBINAS A GÁS, MOTORES STIRLING E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. In: **IV CITENEL Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2007, Araxá. Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída, 2007.

[35] SILVA, C. H. F.; SILVA, E. L. B. ; HOSAMI, M. A.. Desenvolvimento de Modelo para Iniciativas de Inclusão Digital Utilizando Tecnologia Power Line Communication de Banda Larga. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[36] SILVA, C. H. F. et al. Aplicações de Nanotubos de Carbono em Membranas de Troca Protônicas para Células Combustíveis. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[37] SILVA, C. H. F. et al. Desenvolvimento de Membrana Polimérica para Células a Combustível. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[38] SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V.; SOARES, R. R.. Desenvolvimento de Catalisadores para a Reforma de Biomassa e Produção de Hidrogênio. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[39] SILVA, C. H. F. et al. Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

[40] SILVA, C. H. F.. **Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW**. 2015.

[41] SILVA, C. H. F.; CARVALHO, A. M. ; TORRES, E. S.. **Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio e seu uso como Vetor Energético**. 2007.

[42] SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V. ; CARVALHO, A. M.. **Produção de Hidrogênio através da Reforma de Etanol**. 2009.

[43] SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V. . Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Análise Cromatográfica. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

[44] SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V. ; CARVALHO, A. M. . Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Operação Experimental. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

[45] SILVA, C. H. F.; TEIXEIRA, L. C. ; MARTINS, A. F. . Produção de Biodiesel para Geração de Energia Elétrica em Microturbinas e Motores Estacionários. **Biomassa & Energia (Viçosa),** v. 4, p. 101112, 2011.

[46] SILVA, C. H. F. et al. Sistema para Cálculo do Potencial de Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas e Termoelétricas Solares de Grande Porte. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[47] SILVA, C. H. F.; COLTURATO, L. F. D. B. ; SOUZA, L. C. . Desenvolvimento de um sistema de purificação do biogás visando a geração de energia elétrica a partir da metanização da vinhaça. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[48] SILVA, C. H. F.. Gaseificação de Biomassa para Acionamento de Células a Combustível do tipo SOFC. 2015.

[49] SILVA, E. L. B. ; SILVA, C. H. F. ; LOPES, B. M. **Sistema de geração de energia com Motor Stirling**. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica** - Citenel, 2011, Fortaleza.

[50] SODRE, J. R. ; SILVA, C. H. F. . Sistema de Injeção Eletrônica de Hidrogênio para um Motor Diesel Estacionário. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2013, Rio de Janeiro. VII Citenel, 2013.

[51] SPRENGER, H. E.; CANTÃO, M. P. Viabilidade do uso de biogás em células a combustível. **Espaço e Energia**. n 13, 2010. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/13/ee013-01.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.

[52] TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos. Coordenador Chigueru Tiba... *et al*.- - Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. : il., tab., mapas. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em: 02 set. 2016.

[53] TORRES, E. S. et al. Desenvolvimento do Conjunto Motogerador Movido a Álcool Etílico Hidratado. In: **VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2011, Fortaleza. VI Citenel, 2011.

[54] VENTURINI, O. J. et al.. Sistema Frigorífico Por Absorção de Vapor Acionado Por Energia Solar. In: **VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2015, Costa do Sauípe. VIII Citenel, 2015.

Capítulo 2

[1]. BARACHO, R. M. A. PROJETO DE PESQUISA - Gestão da informação para fomentar a sustentabilidade da carteira de geração de energia elétrica com fontes renováveis alternativas APQ-03371-12. Submetido ao Edital 15/2012 – Fapemig. 2012.

[2]. LI, Y.; BONTCHEVA K.; CUNNINGHAM H. Hierarchical, Perceptron-like Learning for Ontology-Based Information Extraction. In: 16th INTERNATIONAL WORLD WIDE WEB CONFERENCE (WWW2007), May, 2007. p. 777-786. Available at: < http://www2007.org/papers/paper428.pdf>.

[3]. MOENS, M.. **Information Extraction:** Algorithms and Prospects in a Retrieval Context (The Information Retrieval Series). Belgium: Springer, 2006. 243 p. Available at: < http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4020-4993-4>.

[4]. DAYA C. W.; DOU D.. Ontology-based information extraction: An introduction and a survey of current approaches. **Journal of Information Science,** Oregon, 36 (3), pp. 306–323. March 2010. Available at: < http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.215.7627&rep=rep1&type=pdf>.

[5]. HOBBS J.R. et al. Interpretation as abduction. In: PROCEEDINGS OF THE 26th ANNUAL MEETING ON ASSOCIATION FOR COMPUTATIONAL LINGUISTICS. Association for Computational Linguistics, Morristown, NJ, 1998. p.95-103. Available at: < http://delivery.acm.org/10.1145/990000/982035/p95-hobbs.pdf?ip=200.150.7.93&id=982035&acc=OPEN&key=4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35%2E6D218144511F3437&CFID=632209009&CFTOKEN=24092798&__acm__=1466170064_548bdcb345dfc6d5300395fc09f7193e>.

[6]. BOYLE, G. **Renewable Energy:** Power for a Sustainable Future. Oxford: The Open University, Oxford University Press, 1996. p. 477.

[7]. RIBEIRO, L. Norte de Minas está na rota da energia limpa e renovável. **Jornal Estado de Minas**, 04 jun. 2012.

[8]. OLIVEIRA, M.; COLEN, F.. A energia que vem do esterco. Boletim UFMG. No. 1628 – Ano 35 – 06/10/2008. Disponível em: <https://www.ufmg.br/boletim/bol1628/3.shtml>. Acesso em: 20 jan. 2015.

[9]. CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL. **Atlas do potencial eólico brasileiro.** Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/principal.php >. Acesso em: 08 fev. 2015.

[10]. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV. **Atlas Digital das Águas de Minas.** Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/>. Acesso em: 23 fev. 2015.

[11]. PEREIRA, E. B. (Coord.) **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Disponível em: <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.04.14.11/doc/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2015.

[12]. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Maio 2012.

[13]. MARCHESIN, D. M. et al. **A Viabilidade da Implantação de Biodigestores para a Geração de Energia Elétrica na Fazenda Rancho Alegre Situada no Município de Campo Grande – MS.** Anais da 58a Reunião Anual da SBPC – Florianópolis, SC – Julho. 2006.

[14]. NORONHA, A. C. G. et al. **Mensuração dos Custos de Implantação de Biodigestores na Suinocultura.** V Encontro de Pesquisadores Latino- Americanos de Cooperativismo, Agosto. 2008.

[15]. TEIXEIRA, J. C. **Atlas Eólico de Minas Gerais**. Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). 2010.

[16]. CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS - CERPCH. Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/>. Acesso em: 23 fev. 2015.

[17]. DOEHLER, F. D.. **Avaliação de Usinas Hidrelétricas**, CERPCH, Artigos Técnicos. 2000.

[18]. KYOCERA. Disponível em: <http://www.kyocera.com.br>. Acesso em: 24 fev. 2015.

[19]. PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos**. Guia PMBoK 4ª Ed. USA. 2008.

[20]. BARACHO, R. M. A.; BONATTI, R. A.; MATTOS, M. C.. Modelo de apoio a decisão para empreendimentos do setor energético. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 15, 2014, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2014.

Capítulo 3

[1] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - EST/UNIFEI. **Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto**. NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 05, Junho 2000.

[2] GOMES, E. E. B.. **Análise técnico-econômica e experimental de microturbinas a gás operando com gás natural e óleo diesel**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, 2002.

[3] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - NEST/UNIFEI. **Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com células a combustível, microturbinas a gás e motores Stirling para a geração de eletricidade – Relatório final**. NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 28, Junho 2006.

[4] GOMES, E. E. B. et al., Performance evaluation and case studies of microturbines fuelled with natural gas and diesel. **Journal of Power and Energy Proceedings of the Imech e Part A**. Grã Bretanha, v. 218, p. 599-607, 2004.

[5] GOMES, E. E. B; LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R.. Case studies of distributed generation with microturbines in Brazil. In: INTERNATIONAL JOINT POWER GENERATION CONFERENCE, Atlanta, 2003.

[6] GOMES, E. E. B; LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R.. **Evaluation of microturbines emissions fueled with natural gas and diesel.** In: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY FOR A CLEAN ENVIRONMENT, Lisboa, 2003.

[7] LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R.; GOMES, E. E. B.. **Economical and Envrironmental evaluation of microturbines applications in Brazil.** In: INTERNATIONAL JOINT POWER CONFERENCE, 2002.

[8] TEIXEIRA, F. N. et al. **Assessment of Distributed Generation for the Brasilian Case.** In: 5º LATIN AMERICAN CONGRESS: ELETRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, São Pedro/SP, 2003.

[9] CARVALHO, A. M. et al. **Avaliação experimental de microturbinas a gás e motores Stirling para geração distribuída de energia com utilização de diferentes combustíveis**. In: XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003.

[10] MALDONADO, M. A. R.. **Modelagem e simulação do sistema de controle de uma microturbina a gás.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, 2005.

[11] NETO, L. J. M.. **Projeto preliminar de uma câmara de combustão de microturbina a gás operando com gás natural e sua modificação para gás de baixo poder calorífico.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, 2003.

[12] ALENCAR, H. S.. **Estudo do comportamento da chama em câmara de combustão para microturbina a gás usando o cálculo da dinâmica de fluido – CFD.** Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 38, Junho 2006.

[13] NASCIMENTO, M. A. R.; ALENCAR, H. S.; VILLANOVA, H. F.. **Análise do comportamento da chama em uma câmara de combustão anular usando o cálculo CFD**. COBEM 2005, Ouro Preto/MG, 2005.

[14] ALENCAR, H. S.; VILLANOVA, H. F.; NASCIMENTO, M. A. R.. **The mathematical approximation in numerical analysis for a combustion chamber for small gas turbine using CFD.** Wseas Transactions on heat and mass transfer, USA, v. 1, n. 2, p. 135-143, 2006.

[15] NASCIMENTO, M. A. R.; ALENCAR, H. S.; VILLANOVA, H. F.. **Preliminary application of CFX as tool in the aerodynamic study of combustion chamber for gás micro turbine.** International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering Lecture Series on Computer and Computational Sciences, Netherlands, v. 1, p. 20-24, 2004.

[16] ALENCAR, H. S.; NASCIMENTO, M. A. R.; VILLANOVA, H. F.. **Analysis of flame behavior in small combustion chambers using CFD.** In: 18th INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, Ouro Preto, 2005.

[17] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - NEST/UNIFEI. **Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto – Etapa IV.** NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 12, Junho 2001.

[18] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - NEST/UNIFEI. **Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto – Nº 5.** NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 08, Novembro, 2000.

[19] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - NEST/UNIFEI. **Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto – Nº 4**. NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 07, Novembro, 2000.

[20] AGUIAR, S. R. S. **Avaliação experimental de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante para biomassa.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, 2003.

[21] ENDEN, P. J. V. D.; LORA, E. E. S. **Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simultion software CSFB.** Biomass and Bioenergy, Elsevier Ltda. Amsterdam, v. 26, p. 281-287, 2004.

[22] ANDRADE, R. V. et al. **Gaseification in fluidized bed: operational and technical evaluation of a prototype using rice husk as fuel.** Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisboa, 2003.

[23] LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.. **Geração de energia e a gaseificação de biomassa.** Biomassa e Energia, Viçosa, v. 1, p. 311-320, 2004.

[24] SAUVANELL, A. L. B.. **Relatório Final do Estágio Pós-Doutorado**. Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 47, Abril, 2006.

[25] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - NEST/UNIFEI. **Projeto CEMIG**. NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 48, Junho 2000.

[26] COBAS, V. R. M.. **Análise de sistemas híbridos com célula a combustível de óxido sólido e microturbinas a gás.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2006.

[27] BARROS, R. W.. **Avaliação teórica e experimental do motor Stirling Solo 161 operando com diferentes combustíveis.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2005

[28] CORRIA, M. E.; COBAS, V. R. M.; LORA, E. E. S.. **Perspectives of Stirling enginees use for distributed generation in Brazil,** v. 34, p.3402-3408, Energy Policy, 2006.

[29] ARADAS, M. E. C.. **Projeto**: Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com células a combustível e microturbinas a gás, para a geração de eletricidade e de sistemas de geração térmica em motores Stirling. Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 53, 2006.

[30] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - EST/UNIFEI. **Modificações nas instalações dos motores Stirling Viebach e Solo para operação com biomassa.** Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 54, 2006.

[31] MEDEIROS, V. A.; MACIEL, C. R. F.. **Experiência da CEMIG na utilização da unidade geradora de biomassa da ORMAT.** CEMIG, MG, Relatório Técnico, TE/2006, 2006.

[32] COBAS, V. R. M.. **Análise Técnico Econômico e Normativo para Implementação da Geração Distribuída.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2000.

[33] VENTURI, O. J.. **Evaluación experimental de una unidad de cogeneración de baja capacidad para su utilización en Sistemas de Generación Distribuida.** Itajubá, Relatório Técnico, 2007.

Capítulo 4

[1] FUNDAÇÃO PARA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA - FITec. **D272 - Desenvolvimento de Modelo para Iniciativas de Inclusão Digital Utilizando Tecnologia Power Line Communication de Banda Larga e Tecnologias Complementares - Uma abordagem Sócio e Tecnológica**. Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel. 2006.

[2] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **Plano de trabalho e anexo ao convênio 4020000315.** 2009.

[3] PIMENTEL, A. X.. **Plano de gerenciamento do projeto - etapa 1**. Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2010.

[4] PIMENTEL, A. X.. **Documento de especificações**. Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2010.

[5] BECK, I. et al. **Relatório social e definição de localidade.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2010.

[6] PIMENTEL, A. X.; MORAES, L. M. M.. **Projeto executivo preliminar.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2010.

[7] BECK, I. et al. **Avaliação de demandas sociais.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2010.

[8] PIMENTEL, A. X.; MORAES, L. M. M.. **Relatório de Implantação.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2011.

[9] BECK, I. et al. **Relatório de acompanhamento de atividades de integração da comunidade - Parte I**. Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2010.

[10] BECK, I.; PEDROSA, I. C. T.. **Relatório das Atividades de Treinamento sobre Informática.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2012.

[11] BECK, I. et al. **Relatório de acompanhamento de atividades de integração da comunidade - Parte II.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2012.

[12] ROMANO, R. B.; CARVALHO, F. F.; CESAR, L. S.. **Rede de Multisserviços utilizando a Infraestrutura de Energia Elétrica.** Artigo publicado pela Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A.

[13] LEITE, L. H. M.; VIEIRA, J. G.. **Supervisão do Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão através de Tecnologia PLC de Banda Larga.** Artigo publicado pela Companhia Energética de Goiás. 2008.

[14] PLC - Fornecedora de serviços e equipamentos. **Relatório de Comissionamento de Equipamentos Instalados na Universidade Cemig 26-09 A 30-09.** 2011.

[15] Fornecedora de serviços e equipamentos PLC. **Relatório de Comissionamento – Projeto PLC – FITec.** 2011.

[16] PIMENTEL, A. X.. **Relatório de Testes Fase 2.** Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2012.

[17] PIMENTEL, A. X.. **Relatório de Testes Fase 1**. Relatório Técnico P&D Cemig/Aneel 272. 2012.

Capítulo 5

[1] AMS – ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário Estatístico.** 2013. Disponível em: <http://silviminas.com.br/wp-content/uploads/2013/06/Anu%C3%A1rio-Estat%C3%ADstico-AMS.pdf>. Acesso em: jul. 2013.

[2] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica.** – Brasília: ANEEL, 2012.

[3] ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acessado em: dez. 2012.

[4] ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Vendas de energéticos no estado de Minas Gerais.** Rio de Janeiro, Mimeo, 2013.

[5] BEZERRA, Maria I. L.; AGUIAR, Ávila P**. Estimativa do consumo residencial de lenha em oito pequenas comunidades rurais do complexo da empresa Miriri Alimentos e Bioenergia – PB**. X Congresso de Ecologia do Brasil, São Lourenço – MG. 2011.

[6] BDMG – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS. 2002. **Minas Gerais do século XXI.** Transformando o Desenvolvimento da Agropecuária. Belo Horizonte. v.4, 2002, 223p.

[7] _____. **Plano mineiro de desenvolvimento integrado – PMDI.** Uma estratégia para o desenvolvimento sustentável. Belo Horizonte, 2003, 175p.

[8] BRASIL, Ministério dos Transportes. **Projeto de Reavaliação de Metas do Plano Nacional de Logística e Transportes.** Brasília, 2012a. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/public/arquivo/arq1352743917.pdf>. Acesso em: jul. 2013.

[9] BRASIL. Resolução ANP n.14, de 11 de mai. 2012. Diário Oficial da União, Brasil, 18 mai. 2012. p.82.

[10] CAMPOS, A. T. de. **Balanços energéticos agropecuários:** uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. Ciência Rural. v.34, n.6, 2004.

[11] CASTRO, J. B. de; MONTINI, A. de A.. **Previsão do Consumo Residencial de Energia Elétrica no Brasil:** Aplicação do Modelo ARX. Revista Future Studies Research Journal, São Paulo – SP, v.2 n.2, p.03-16, 2010.

[12] CEEE – GRUPO DA COMPANHIA ESTADUAL DE DISTRIBUIÇÃO ENERGIA ELÉTRIA / SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA E LOGÍSTICA DO RIO GRANDE DO SUL. **Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2011**: ano base 2010. Porto Alegre, 2011.192p.

[13] CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Balanço Energético de Minas Gerais (BEEMG) 2011.** Disponível em: < http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/26BEEMGcc.pdf>. Acesso em: mai. 2013.

[14] _____. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Balanço Energético de Minas Gerais (BEEMG) 2010**. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/Inovacao/AlternativasEnergeticas/Documents/25BalancoEnergeticoRev.pdf>. Acesso em: mar. 2012.

[15] CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **A importância do setor de transporte.** Brasília, 2012.

[16] DIEHL, A. A.; TATIM, D. C.. **Pesquisa em ciências sociais aplicada** – métodos e técnicas. São Paulo: Prentice Hall, 2004, Cap. 4 – Metodologia, método e técnica de pesquisa.

[17] FALCO, G. de P.. **O Perfil Econômico do Consumidor Residencial de Energia Elétrica no período entre 1994-2003.** Revista das Faculdades Integradas Vianna Junior, Juiz de Fora – MG, v.1 n.1, p.126-151, 2010.

[18] FJP – FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Pesquisa por Amostra de Domicílios de Minas Gerais (PAD-MG). 2009.** Disponível em: <http://www.fjp.gov.br/index.php/indicadores-sociais/-pesquisa-por-amostra-de-domicilios-pad-mg>. Acesso em: mar. 2012.

[19] _____. Demanda Residencial de Lenha em Minas Gerais, 2012 (Relatório intermediário da revisão metodológica do BEEMG). Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2012.

[20] _____. Estudo do processo atual de elaboração do balanço energético de Minas Gerais, 2013 (Relatório intermediário da revisão metodológica do BEEMG). Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2013.

[21] _____. **Pesquisa por Amostra de Domicílios de Minas Gerais (PAD-MG). 2009.** Disponível em: <http://www.fjp.gov.br/index.php/indicadores-sociais/-pesquisa-por-amostra-de-domicilios-pad-mg>. Acesso em: dez. 2012.

[22] _____. **Pesquisa por Amostra de Domicílios de Minas Gerais (PAD-MG). 2011.** Disponível em: <http://www.fjp.gov.br/index.php/indicadores-sociais/-pesquisa-por-amostra-de-domicilios-pad-mg>. Acesso em: abr. 2013.

[23] FOUNIER, A. C. P.; PENTEADO, C. L. de. **Energia Elétrica do Setor Residencial a Luz do Consumo Consciente:** Resultado do Estudo de Caso no Município de Santo André (SP)1. In: V ENCONTRO NACIONAL DA ANNPAS. Florianópolis – SC, 2010, Disponível em: <http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT17-266-239-20100903221411.pdf>. Acesso em: 16 out.2012.

[24] FURLANETTO, C.; POSSAMAÍ, O.. **O uso da energia elétrica no ambiente residencial**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Salvador–BA, 2001, Disponível em: < http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2001_TR51_0009.pdf>. Acesso em: 15 out.2012.

[25] GARCEZ, E. W.; GHIRARDI, A. G.. **Elasticidade da demanda residencial de energia elétrica.** In: XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA. Porto Seguro – BA, 2003, Disponível em: <http://www.anpec.org.br/encontro2003/artigos/D34.pdf>. Acesso em: 17 out.2012.

[26] GARCIA, R. A. **Projeção das Emissões de Dióxido de Carbono (CO2) da Matriz Energética do Estado de Minas Gerais – 2005 – 2030. 2009.** 102 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia da Energia) – Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. 2009.

[27] GASMIG - Companhia de Gás de Minas Gerais. **Vendas de gás natural no estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte, Mimeo, 2013.

[28] GUARDABASSI. P. M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento.** 2006. 123 f. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2006/Teses/Dissertacao_Guardabassi.pdf.>. Acesso em 14 out.2012.

[29] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário de 1980.** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 1983-1984. 26v. – (IX Recenseamento geral do Brasil 1980, 9. v.2; Tomo 3. Número 1 - Brasil).

[30] _____. **Censo Agropecuário de 1985.** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 1985. p.1-400. Número 1 - Brasil).

[31] _____. **Censo Agropecuário de 1995.** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 1998. p.1-366. Número 1 - Brasil).

[32] _____. **Censo Agropecuário de 2006.** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 2006. p.1-777).

[33] _____. **Censo Demográfico de 1960:** Minas Gerais. Rio de Janeiro, 1962. Volume 1, Tomo IX.

[34] _____. **Censo Demográfico de 1970:** Minas Gerais. Rio de Janeiro, 1973. Volume I, Tomo XIV, 2ª parte.

[35] _____. **Censo Demográfico de 1980:** famílias e domicílios Minas Gerais. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 1983. 26v. – (IX Recenseamento geral do Brasil 1980. v.1; Tomo 6. Número 16).

[36] _____. **Censo Demográfico de 1991:** famílias e domicílios Minas Gerais. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 26v. – (X Recenseamento geral do Brasil 1991. Número 18).

[37] _____. **Censo Demográfico de 2000:** famílias e domicílios Minas Gerais. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

[38] _____. **Censo Demográfico de 2010:** características da população e dos domicílios. Resultados do universo. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 2011. 270 p.

[39] _____. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** – Rio de Janeiro: IBGE, 2013a.

[40] _____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). 2001.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2009/>. Acesso em: abr. 2013.

[41] _____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). 2009.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2009/>. Acesso em: mar. 2012.

[42] _____. **Pesquisa Pecuária Municipal.** – Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

[43] _____. **Produção Agrícola Municipal.** – Rio de Janeiro: IBGE, 2013b.

[44] _____. **Produção da extração vegetal e silvicultura 2005**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de agropecuária, 2006, v.20. 47 p.

[45] _____. **Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF).** 2008-2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/sipd/quarto_forum/Informe_POF_2008-2009.pdf >. Acesso em: mar. 2012.

[46] KAMIMURA, A.; BURANI, G. F.. **Sobre o consumo de lenha domiciliar rural nas regiões brasileiras.** In ABREU, Yolanda V. A.; OLIVEIRA, Marco A. G.; GUERRA, Sinclair M. G. Energia, Economia, Rotas Tecnológicas. Textos Selecionados. Málaga – Espanha: Universidade de Málaga. 2010.

[47] LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A.. **Fundamentos da metodologia científica.** 3 ed. revista e ampliada. São Paulo: Atlas, 1991, Cap. 4 – Métodos científicos.

[48] LÓPEZ, J. C. F.; SILVA, M. L.; SOUZA, A. L. **Consumo residencial de lenha em Santa Cruz,** Viçosa-MG, Brasil. Revista Árvore. Viçosa-MG. v.24, n.4, p.423-428. 2000.

[49] MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing – uma orientação aplicada.** 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

[50] MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M.. **Técnicas de pesquisa.** 2 ed. São Paulo: Atlas, 1990, Cap.3 – Técnicas de Pesquisa.

[51] MATA, H. T. C.; SOUZA, A. L. **Estimativa do Consumo residencial de lenha num distrito do Estado de Minas Gerais,** Brasil. Revista Árvore. Viçosa-MG. v.24, n.1. 2000.

[52] MINAS GERAIS. Portaria n.074, de 03 de junho de 2004. Diário do Executivo, Minas Gerais, p.28 e 29, jun. 2004.

[53] _____. Resolução SEMAD/IEF n.1.658, de 27 de jul. 2012. Institui o Selo de Origem Florestal – SOF para o carvão vegetal empacotado e o Selo de Origem Florestal para Exportação – SOFEX e dá outras providências. Diário Oficial, Minas Gerais, 28 jul. 2012. p.30.

[54] MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional (BEN).** 2010. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em: mar. 2012.

[55] _____. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2011.** Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em jun. 2013.

[56] _____. **Balanço Energético Nacional (BEN). 2012.** Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: jul. 2013.

[57] _____. **Nota técnica COBEN 04**. Novo fator de conversão para lenha. 1988. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/1_-_Sobre_o_BEN/NT_COBEN_04.pdf>. Acesso em: mar. 2012.

[58] _____. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Nota técnica DEN 04/08**. O Crescimento Recente do Consumo Residencial de Energia Elétrica na Região Nordeste. Rio de Janeiro: jul. 2008.

[59] MOURA, A. C. M.. **Novas Tendências de Consumo de GLP** – Gás Liquefeito de Petróleo no Brasil. 2012. 47 f. Monografia (Pós Graduação em Engenharia e Negócios de Gás e Petróleo) – Centro Universitário do Instituto de Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

[60] PATUSCO, J. A. M.. **Avaliação do consumo residencial de lenha e carvão vegetal no balanço energético nacional.** Nota técnica COBEN 07/88. Brasília, Departamento Nacional de Política Energética, 1988. 5p.

[61] PATUSCO, J. A. M.. **A lenha na matriz energética brasileira.** Brasília, Departamento Nacional de Política Energética, 2002, 3p.

[62] PEREIRA, A. P. de A. **Consumo Residencial de Energia e Desenvolvimento Humano:** Um estudo da realidade brasileira de 1970 a 2005. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia.) – Instituto de Psicologia, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. 2007.

[63] PEREIRA, E. M. D.; OLIVEIRA, L. G. M. de. **Encarte Energia Solar Térmica.** 2012. Assessoria e consultoria pra p 25º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais (BEEMG).

[64] SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria de Saneamento e Energia. **Projeção de Consumo de Energia e Energéticos e de Emissões de CO2,** São Paulo, 2008–2020. São Paulo, 2009.

[65] SCHAEFFER, R.; SZLO, R.; MACHADO, G. **Matriz energética brasileira** – 2003-2023. Relatório técnico, PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

[66] SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. **Matriz Energética de Minas Gerais** – 2007-2030. Relatório técnico. PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

[67] SCFAI – SUBSECRETARIA DE CONTROLE E FISCALIZAÇÃO AMBIENTAL INTEGRADA. **Relação de selos expedidos em Minas Gerais.** Belo Horizonte, Mimeo, 2013.

[68] SEAPA – SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DE MINAS GERAIS. **Perfil do agronegócio de base florestal de Minas Gerais.** 2011. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/download.php?tabela=documentos&id=975>. Acesso em: mar. 2012.

[69] SEF – SECRETÁRIA DE ESTADO DA FAZENDA DE MINAS GERAIS. 2013. Disponível em: <http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/classificacao_atividades/cnae.htm>. Acesso em: jul. 2013.

[70] SEMAD – SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Relação de selos expedidos em Minas Gerais.** Belo Horizonte, Mimeo, 2013.

[71] UFRJ – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE e UNIFEI – UNIVERSIDADE

FEDERAL DE ITAJUBÁ/Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia. **Matriz Energética de Minas Gerais 2007-2030** – Sumário Executivo. [s/l]. UFRJ e UNIFEI. Outubro de 2007. Cap. 5 – Setor Residencial. 2007. Disponível em: <http://www.conselhos.mg.gov.br/coner/page/publicacoes/matriz-energtica-de-mg>. Acesso em: dez. 2012.

[72] UHLIG, A. **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo.** Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia. São Paulo – SP. 2008.

[73] VALE, A. T.; RESENDE, R.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F.. **Estimativa do consumo residencial de lenha em uma pequena comunidade rural do município de São João D'Aliança** – GO. Ciência Florestal. Santa Maria – RS. v.13, n.2, p.159-165. 2003.

[74] VIANA JUNIOR, L. **Cogeração:** desenvolvimento de metodologia para avaliação energética - estudo de caso aplicado a indústria de papel e celulose. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 1999. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngEletrica_VianaJuniorL_1.pdf>. Acessado em: jul. 2013.

[75] CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Relatório do projeto P&D 474 – Estabelecimento de Proposta Metodológica para elaboração do Balanço Energético do Estado de Minas Gerais.**

Capítulo 6

[1] United States Department of Energy.

Capítulo 7

[1] COSTAMAGNA, P.; SRINIVASAN, S.. **Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000*1:** Part I. Fundamental scientific aspects. J. Power Sources, vol. 102, pp 242–252, 2001.

[2] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. Available: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/overview.html>.

[3] MUKERJEE,S.; SRINIVASAN,S.; APPLEBY, A.J.. **Effect of sputtered film of platinum on low platinum loading electrodes on electrode kinetics of oxygen reduction in proton exchange membrane fuel cells**. Electrochim. Acta, vol. 38, pp. 1661–1669, 1993.

[4] LACERDA, R. G.. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº1 ano 1, Mar. 2009.

[5] Wikipedia. **Nanotubo de Carbono.** Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Nanotubo_de_carbono>. Acesso em: 07 set. 2012.

[6] POOLE JR., C. P.; OWENS, F. J.. **Introduction to nanotechnology.** Hoboken: Wiley, 2003, p. 388.

[7] HELIX. **Carbon Nanotubes Price List.** Disponível em: <http://www.helixmaterial.com/Ordering.html>. Acesso em: 07 nov. 2012.

[8] SCIENCE DAILY. **New Method for Continuous Production of Carbon Nanotubes.** Disponível em: <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/04/120412105109.htm>. Acesso em: 07 nov. 2012.

[9] LACERDA, R. G.. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis**. CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Formulário de projeto, 2006.

[10] _____. **Proposta de pesquisa – P&D 228.** UFMG, Junho, 2007.

[11] _____.**P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº 2 ano 1, Mai. 2009.

[12] _____.**P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº 3 ano 1, Jul. 2009.

[13] _____.**P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº4 ano 1, Nov. 2009.

[14] _____. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº5 ano 1, Abr. 2011.

[15] _____. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº2 ano 2, Out. 2010.

[16] _____. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº3 ano 2, Out. 2010.

[17] _____. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº4 ano 2, Abr. 2011.

[18] _____. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº5 ano 2, Abr. 2011.

[19] _____. **P&D228 – Aplicações de nanotubos de carbono em membranas de troca protônicas para células combustíveis.** CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº6 ano 2, Abr. 2011.

Capítulo 8

[1] DEWULF, J.; LANGENHOVE, H. V.. **Renewables-based technology:** Sustainability assesment. West Sussex: Wiley, 2006, p. 354.

[2] SOUZA, J. C. et al. Síntese E Caracterização Do Monômero 2,2'-Dialilbisfenol-A (Abfa) Para A Obtenção De Membranas Trocadoras De Prótons Baseadas Em Poli(Arileno Éter Sulfona)S

Sulfonadas Reticuladas.. In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2011, Campos do Jordão. Anais de 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011.

[3] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº1, Dez. 2008.

[4] EG&G Technical Services, Inc. Fuel Cell Handbook, 7ª Ed. West Virginia. Disponível em: < http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/834188/834188.pdf>. Acesso em 06/11/2012.

[5] FREITAS, R. F. de S., "Proposta de pesquisa – P&D 232", UFMG, Outubro, 2007.

[6] FREITAS, R. F. de S., "P&D 232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial/Final nº9, Dez. 2010.

[7] MITCHELL, B. S. An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineering. New York: Wiley, 2004, p. 969.

[8] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº5, Nov. 2009.

[9] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº6, Nov. 2009.

[10] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº2, Abr. 2009.

[11] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº3, Abr. 2009.

[12] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº4, Jun. 2009.

[13] FREITAS, R. F. de S., "P&D232 – Desenvolvimento de membrana polimérica para célula a combustível," CEMIG GT SA, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico Parcial nº8, Out. 2010.

[14] SOUZA, J. C. et.al. **Synthesis and Characterization of the Monomer 2,2 diallylbisphenol-A (ABFA) for obtaining Proton Exchange Membranes based on Crosslinked Sulphonated Poly(Arylene ether sulphone)s.** Macromolecular Symposia, v. 319, p. 150-160, 2012.

[15] SOUZA, J. C.. **Uma contribuição ao estudo das células a combustível:** síntese e caracterização do monômero 2,2'-Dialilbisfenol-A (ABFA) para a Obtenção de Membranas Trocadoras De Prótons Baseadas em Poli(Arileno Éter Sulfona)S Sulfonadas Reticuladas. Dissertação de Mestrado, UFMG, 2010.

[16] CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio Energético no Brasil:** Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Brasília. 2010.

Capítulo 9

[1] WIKIPEDIA. Hidrogénio. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Hidrog%C3%A9nio>. Acesso em 27 dez. 2012.

[2] SOARES, R. R. “Projeto de P&D Cemig/Aneel GT 288 – Catalisadores para reforma de biomassa”. Projeto de Pesquisa. Cemig. 2006.

[3] SILVA, C. H. F.et al. **Produção de Hidrogênio Através da Reforma de Etanol.** In: V CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELETRICA - CITENEL, 2009, Belém. Produção de Hidrogênio Através da Reforma de Etanol, 2009.

[4] SOARES, R. R.. **1º Relatório:** Planejamento Inicial e Revisão Bibliográfica. Relatório de Pesquisa, UFU, Junho, 2010.

[5] CORTRIGHT, R.D.; DAVDA, R.R.; DUMESIC, J.A.. **Nature**. 2002, 418, 964-967.

[6] SOARES, R.R.; SIMONETTI, D.A.; DUMESIC**,** J.A.. **Angewandte Chemie Int.** Ed. 2006, 45, 1-5.

[7] KUNKES, E.L. et al. **Applied Catalysis B**. 2009, 90,693-698.

[8] MARTINS, D. F.. **Contribuição ao Estudo da Reforma a Vapor do Glicerol em Catalisadores Pt/C - Efeito do Tamanho da Partícula de Pt e do Ph da Solução de Alimentação**. Dissertação de Mestrado. UFU. 2006.

[9] SOARES, R.R.. **2º Relatório:** Estudo de Catalisadores para Reforma da Glicerina e para Reação de Water-Gas-Shift – Preparação Caracterização e Avaliação de Catalisadores nas Reações de Reforma da Glicerina e Water-Gas-Shift. Relatório de Pesquisa, UFU, Agosto, 2010.

[10] SOARES, R.R.. **3º Relatório:** Estudo dos catalisadores PT/Al2O3 para reforma da glicerina”. Relatório de Pesquisa, UFU, Setembro, 2011.

[11] SOARES, R.R.. **Relatório Final:** Desenvolvimento de catalisadores para produção de hidrogênio. Relatório de Pesquisa, UFU, Novembro, 2012.

[12] CASTRO, R. H. R.; GOUVEA, D.; **Cerâmica**, v. 49, p. 309, 2003.

Capítulo 10

[1] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro, EPE, 2009.

[2] ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. Aneel, Brasília, 2008.

[3] EFFICIENTIA. Relatório Efficientia 2007. Efficientia, Belo Horizonte, 2008.

[4] CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Relatório de Sustentabilidade 2008. Cemig. Belo Horizonte, Abril, 2009.

[5] LORA, E. E. S.; MEDEIROS, V. A. D237 - Avaliação teórico-experimental da gaseificação de biomassa para o acionamento de células a combustível de óxido sólido (SOFC). Projeto de P&D D237, 2006.

[6] CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico nº 5. Cemig. Belo Horizonte, 2009.

[7] ZACARIAS, R. D.; MATENCIO, T.; BRANT, M. C.. **Relatório nº 1 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2004.

[8] MENCH, M. M.. **Fuel Cell Engines.** John Wiley &Sons Inc., Canada, 2008.

[9] ZACARIAS, R. D.; DINIZ, J. H.. **Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W.** Projeto de P&D Cemig/Aneel nº 097, Belo Horizonte, 2002.

[10] ZACARIAS, R. D.; MATENCIO, T.; BRANT, M. C.. **Relatório nº 2 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2004.

[11] _____. **Relatório nº 3 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.

[12] _____. **Relatório nº 4 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.

[13] _____. **Relatório nº 5 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.

[14] _____. **Relatório nº 6 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.

[15] _____. **Relatório nº 7 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.

[16] _____. **Relatório nº 8 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.

[17] _____. **Relatório nº 9 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.

[18] _____. **Relatório nº 10 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.

[19] _____. **Relatório nº 11 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2007.

[20] _____. **Relatório nº 12 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2008.

[21] _____. **Relatório nº 13 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2008.

[22] _____. **Relatório nº 14 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2009.

[23] _____. **Relatório nº 15 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2009.

[24] _____. **Relatório nº 16 – P&D 097.** Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2009.

Capítulo 11

[1] CHU, S.; MAJUMDAR, A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. Nature, v. 488, n. 7411, p. 294-303, 2012.

[2] GUO, K. W. Green nanotechnology of trends in future energy: a review. International Journal of Energy Research, v. 36, p. 1-17, 2012.

[3] Fuel cell Handbook. US Department of Energy: West Virginia, 2004, pp. 1-34. [Online]. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov>.

[4] WACHSMAN, E. D.; LEE, K. T. Lowering the Temperature of Solid Oxide Fuel Cells. Science, v. 334, n. 6058, p. 935-939, 2011.

[5] MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. Comparative study of different fuel cell technologies. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 981-989, 2012.

[6] SILVA, C. H. F (Org.). Alternativas Energéticas - Uma visão Cemig. Cemig: Belo Horizonte, 2012, pp. 346-349. [Online] Disponível em: <http://www.cemig.com.br>.

[7] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; NASCIMENTO, G. L. T. GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível – LaMPaC. Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 02, Setembro, 2011.

[8] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; NASCIMENTO, G. L. T. GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível – LaMPaC. Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 03, Março, 2012.

[9] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; NASCIMENTO, G. L. T. "GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível – LaMPaC. Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 04, Julho, 2012.

[10] DOMINGUES, R. Z, MATENCIO, T, "Minicurso Pilhas a Combustível para Aplicações Estacionárias" LaMPaC, Belo Horizonte, MG, Junho. 2013.

[11] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; NASCIMENTO, G. L. T. GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível - LaMPaC, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 05, Maio, 2013.

[12] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; ALMEIDA, R. M. GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível - LaMPaC, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. Relatório Técnico. Relatório Final, Outubro. 2014.

[13] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; NASCIMENTO, G. L. T. GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível - LaMPaC, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 08, Janeiro. 2014.

[14] DOMINGUES, R. Z.; MATENCIO, T.; ALMEIDA, R. M. GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 Kw. Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível - LaMPaC, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 09, Setembro. 2014.

Capítulo 12

[1] SILVA, S. A.. **Hidrogênio e Células a Combustível:** diagnóstico da utilização dessa tecnologia alternativa para geração de energia. Relatório de Estágio, TE, Novembro, 2006.

[2] NETO, E. H. G.. **Hidrogênio, Evoluir sem poluir**: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustíveis. Curitiba, Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005.

[3] GARCIA, J. L. A.. Produção de Hidrogênio Eletrolítico Utilizando Energia Secundária ou Fora de Ponta e seu Uso como Vetor Energético. Relatório Técnico 1800-ST-32, Belo Horizonte, Dezembro, 1999.

[4] ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Revista de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel. Nº 1, Brasília, Agosto, 2006.

[5] SILVA, C. H. F. Descrição dos Processos do Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio - Medidas de Segurança Implementadas. Relatório Técnico, TE/Abril/2006.

[6] SILVA, E. P. da. Eletrólise da água. SEMINÁRIO APRESENTADO NO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNICAMP. Campinas, 1990.

[7] JUNIOR, N. P. N. Determinação cromatográfica quantitativa de gases leves em hidrogênio. Tese de doutorado, UNICAMP, 1995.

[8] CARVALHO, A. M.; SANTOS, R. J dos. Montagem do Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e Seu Uso Como Vetor Energético,

[9] SILVA, S. A. et al. Procedimento de Segurança – Laboratório Experimental de Hidrogênio. Relatório Técnico, Maio, 2007.

[10] BURKE, R.. Hazardous materials chemistry for emergency responders. CRC Press Inc., USA, 1997.

[11] NPFA – NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NPFA 69 – Standard on Explosion Prevention Systems. NPFA, USA, 2002.

[12] NASA. Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Office of Safety and Mission Assurance, 1997, Disponível em: <www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2016.

[13] SILVA, E. P. da. Normas de segurança para manuseio e utilização de cilindros pressurizados contendo hidrogênio. Emope Gráfica e Editora Ltda, 1992.

Capítulo 13

[1] PERES, E. S.; TORRES, E. S. P&D181 - Produção de Hidrogênio por processo eletrolítico e reforma de etanol, em alto grau de pureza para utilização como vetor energético no laboratório da UTE Igarapé da CEMIG. Cemig GT SA., Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 181, 2005.

[2] TORRES, E. S.; SILVA, C. H. F da; CARVALHO, A. M. P&D 108 - Produção de Hidrogênio através da Reforma de Etanol. Cemig GT SA., Belo Horizonte, Relatório Final, P&D Cemig/Aneel nº 108, 2008.

[3] CAIRES, M.I.; DINIZ, J. H. P&D 008 - Célula combustível de polímero condutor iônico. Cemig SA., Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 008, 2000.

[4] SILVA, C. H. F. da; CARVALHO, A. M.; TÔRRES, E. S. Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético. In: IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, Araxá, 2007.

[5] SILVA, C. H. F da. O estado comercial de células a combustível. Cemig GT AS, Relatório Técnico, 2008.

[6] ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica. Brasília, 2008.

[7] SILVA, C. H. F da; MADUREIRA, A. J. V. Tecnologias do Hidrogênio dentro do Planejamento Estratégico 2008-2013. Cemig GT SA, TE/AE001/08, 2008.

[8] LARSEN, H; FEIDENHANS'L, R.; PETERSEN, L. S. Hydrogen and its competitors, Risø National Laboratory, 2004.

[9] LARSEN, H, R.; PETERSEN, L. S. Future Energy Systems – Distributed production and use, Risø National Laboratory, 2005.

[10] _____. Future options for energy technology, Risø National Laboratory, 2007.

[11] _____. Renewable energy for power and transport, Risø National Laboratory, 2006.

[12] NASA, "Safety standard for hydrogen and hydrogen systems", Office of Safety and Mission Assurance, 1997. Disponível em: <www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf>.

[13] SILVA, E. P. da. Normas de segurança para manuseio e utilização de cilindros pressurizados contendo hidrogênio. Emope Gráfica e Editora Ltda, 1992.

[14] SILVA, M. E. Manual de Operação e Manutenção do Sistema de Reforma de Etanol. Relatório Técnico, 2006.

[15] _____. Propostas de melhoria no Sistema de Reforma de Etanol. Relatório Técnico, 2006.

[16] _____. Análise de custo de produção de hidrogênio em USD/kWh de poder calorífico inferior. Relatório Técnico, 2006.

[17] _____. Assistência Técnica: Montagem, desmontagem e interligação do sistema de reforma", Relatório Técnico, 2007.

[18] GARCIA, J. L. A.; PALHAVAN, P. F.. Relatório 24 Projeto de P&D 181. Relatório Técnico, 2009

[19] SILVA, C. H. F. da, et al. Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol. In: V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL. Belém, 2009.

Capítulo 14

[1] SHREVE, R. N. ; JUNIOR, J. A. B. Indústria de Processos Químicos. 4º Ed, Editora Guanabara-Dois, 1980.

[2] SILVA, C. H. F da; MADUREIRA, A. J. V. " Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio" , Cemig GT SA., Belo Horizonte, Artigo Técnico anexo ao relatório final do P&D nº 181, 2009.

[3] PERES, E. S.; TORRES, E. S. P&D181 - Produção de Hidrogênio por processo eletrolítico e reforma de etanol, em alto grau de pureza para utilização como vetor energético no laboratório da UTE Igarapé da CEMIG. Cemig GT SA., Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 181, 2005.

[4] SILVEIRA, J. L.; CARVALHO, A. M. P&D 108 - Produção de Hidrogênio por reforma de etanol. Cemig, Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 108, 2003.

[5] DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. Fuel Cell Handbook. National Energy Technology Laboratory. Morgantown, West Virginia, 2004.

[6] COLLINS, C. H.; BRAGA, G. L.; BONATO, P. S. Fundamentos de Cromatografia. Ed. Unicamp, 2006.

[7] GARCIA, J. L. A.; DINIZ, J. H. P&D 050 – Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio da Cemig. Cemig. Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 050, 2000.

[8] SILVA, C. H. F. da; CARVALHO, A. M.; TÔRRES, E. S. Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético. In: IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL. Araxá, 2007.

[9] SILVA, C. H. F. da, et al. Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol. In: V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, Belém , 2009.

[10] PRES, E. S. Eletrólise da água. In: Seminário no curso de pós-graduação da disciplina de Fundamentos de Eletroquímica Aplicada. Unicamp, 1990.

[11] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 – Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, ISO, 2005.

[12] ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Hydrogen fuel – Product Specification. ISO 14687:1999.

[13] NEVES JUNIOR, N. P. Determinação cromatográfica quantitativa de gases leves em hidrogênio. Tese de doutorado, Unicamp, 1995.

[14] RIBANI, et al. Validação em Métodos Cromatógraficos e Eletroforéticos. Quim. Nova, Vol. 27, Nº 5, 771-780, 2004.

[15] MADUREIRA, A. J. V.; SILVA, C. H. F da. Operação do Cromatógrafo SimpleChron. Cemig, PO LH/001, Belo Horizonte, 2008.

Capítulo 15

[1] CARVALHO, A. M.; SILVEIRA, J. L. P&D108 – Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol. Projeto Cemig/Aneel Ciclo 2002/2003.

[2] SHEREVE, R. N.; BRINK, J. A.. Indústria de Processos Químicos. Editora LTC.

[3] SILVEIRA, J. L. et al. Processo de Reforma a Vapor do Etanol. Relatório de Pesquisa Bibliográfica – Mês 1, Nov./2003.

[4] SILVA, C. H. F. da; CARVALHO, A. M.; TÔRRES, E. S.. Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético. In: Proc. IV Citenel, Novembro, 2007.

[5] SOUZA, A. C. C. de; SILVEIRA, J. L.; SOSA, M. I.. Análises Físico –Química e Termodinâmica do Reformador de Etanol para Produção de Hidrogênio.

[6] SILVEIRA, J. L. et al. Análise Termodinâmica da Reforma de Etanol: influência da temperatura e da pressão no processo de produção de hidrogênio", Relatório– Mês 2, Nov./2003

[7] SILVEIRA, J. L. et al. Elaboração do catalisador escolhido para implementação do protótipo de reformador de etanol fundamentado no processo de reforma –vapor. Relatório– Mês 6, Maio/2004.

[8] SILVEIRA, J. L. et al. Catalisadores para o processo de reforma-vapor do Etanol. Relatório– Mês 6, Julho/2004.

[9] SILVA, E. P da, et al. Catalisadores para o processo de reforma a vapor de etanol – parte VIII. Relatório de pesquisa bibliográfica, P&D 108, Mês 15, Fevereiro/2005.

[10] HYTRON. Sistema de Purificação de Hidrogênio PSA – Manual de instalação, operação e manutenção. Manual modelo PRT 0106, Abril, 2006.

[11] SILVEIRA, J. L. et al. Relatório Final. Maio/2006.

[12] SILVEIRA, J. L. et al. Estudo e assistência técnica –desmontagem, montagem e interligação do sistema de reforma. Relatório de assistência técnica, Maio, 2008.

[13] MARTINS, A.F. Biorrefinarias. 1º SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE MADEIRA ENERGÉTICA. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

[14] KNUPP, W. F. Certificado de ensaio nº 213496. Relatório técnico, Belo Horizonte, Brasil, junho/2008.

[15] KNUPP, W. F. Certificado de ensaio nº 213497. Relatório técnico, Belo Horizonte, Brasil, junho/2008.

Capítulo 16

[1] ALCKMIN FILHO, J.G.R., O biodiesel e outros combustíveis a partir do eucalipto, **Informativo Técnico Renabio**, nº 002, 2006.

[2] ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/leilao_biodiesel.asp.>. Acesso em 18 out. 2009.

[3] BIODIESELBR. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/producao-biodiesel-superou-demanda-11-02-09.htm>. Acesso em 15 out. 2009.

[4] BONALUME, W. L. **Biodiesel – a solução do agronegócio**, Ed. Letra Boreal, 2007.

[5] MENANI, R. (Ed). **Revista Biodiesel**, Ed. Letra Boreal, Ano 2 , nº 14, Março, 2007.

[6] MENANI, R. (Ed). **Revista Biodiesel**, Ed. Letra Boreal, Ano 2 , nº 19, Agosto, 2007a.

[7] MENANI, R. (Ed). **Revista Biodiesel**, Ed. Letra Boreal, Ano 2 , nº 16, Agosto, 2007b.

[8] MENANI, R. (Ed). **Revista Biodiesel**, Ed. Letra Boreal, Ano 2 , nº 12, Janeiro, 2007c.

[9] MENANI, R. (Ed). **Revista Biodiesel**, Ed. Letra Boreal, Ano 2 , nº 13, Fevereiro, 2007d.

[10] NEGRELLO, L., ZENTI, L. (Ed) **Revista Biodieselbr,** BiodieselBR, Ano 1, nº3, Fevereiro/Março, 2008.

[11] SANTOS, R. M. G DOS et al. Disponível em: <http://sec.sbq.org.br/cd29ra/resumos/T2140-1.pdf>. Acesso em 08 jan. 2010.

[12] SAHAHY, **1º anuário brasileiro de biodiesel**, Ed. Letra Boreal, 2007.

[13] SEBRAE, **Biodiesel**, SEBRAE, 2006.

[14] TEIXEIRA, L. C. **Proposta de pesquisa – P&D 141**, CETEC, Abril, 2009.

[15] TEIXEIRA, L. C. Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. ***Informe Agropecuário, Vol. 26, n. 229***, 2005, ISSN 01003864, pág. 18-27.

[16] TEIXEIRA, L. C. **Proposta de pesquisa – P&D 141**, CETEC, Agosto, 2004.

[17] TEIXEIRA, L. C. **Proposta de pesquisa – P&D 141**, CETEC, Julho, 2009a.

[18] TEIXEIRA, L. C., CARVALHO, A. M. **P&D141 - Produção de biodiesel para geração de energia elétrica em micro-turbinas e motores estacionários**, Cemig GT SA., Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 141, 2003.

[19] WIKIPEDIA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>. Acesso em: 06 jan. 2010.

[20] WORLD ENERGY CONCIL. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/bioenergy/714.asp>. Acesso em 16 out. 2009.

Capítulo 17

[1] MONTEBELLER, S. J.. **Eletrônica II**. Faculdade de Engenharia de Sorocaba, 2012.

[2] MESSIAS, A. R.. (2012, April 10). Comunicação com a porta serial. [Online]. Disponível em:<http://www.rogercom.com/PortaSerial>.

[3] VALENTE, O. S.. Desempenho e emissões de um motor-gerador de energia elétrica operando com biodiesel. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

[4] MORAIS, A. M. Avaliação do desempenho de um motor diesel operando com óleo diesel e hidrogênio. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

[5] RAKOPOULOS, C. D. et al. Availability analysis of hydrogen/natural gas blends combustion in internal combustion engines. **Energy**. Vol. 33, pp. 248-255, Feb. 2008.

[6] MENDES, L. A. N. et al. Simulação numérica de um motor diesel operando com hidrogênio como combustível. **SAE Technical Paper Series**, SAE 2011-36-0053, 2011.

Capítulo 18

[1] IEL – INSTITUTO EUVALDO LODI. Álcool Combustível. IEL Núcleo Central, Brasília, 2008.

[2] SILVA, J. E.; CARVALHO, A. M. P&D 119 - Conjunto motogeradores de eletricidade usando motores de combustão interna movidos a álcool hidratado. Cemig SA, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 141, 2002.

[3] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Disponível em: <http://cemignet/tec/pd_cemig_aneel/ped_cemig_aneel/ped-htm/119.htm>. Acesso em: 21 out. 2009. .

[4] FELIX, C. H. C. et al. Conjunto moto-gerador de eletricidade usando motor de combustão interna, movido a álcool hidratado. CETEC, Belo Horizonte, MG, Relatório técnico final. P&D119, Dez, 2006.

[5] Relatório Técnico – Contrato entre CETEC e CEMIG, 2003. Estudos preliminares de viabilidade técnica para construção de grupos motogeradores de eletricidade, movidos a motor a álcool hidratado.

Capítulo 19

[1] LORA, E.E.S.; CARBALHO, A. M., "P&D123 – Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling", Projeto Cemig/Aneel Ciclo 2003/2004.

[2] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 1ª etapa, UNIFEI, 2006.

[3] WIKIPÉDIA. Motor Stirling. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling>. Aacesso em: 08 de mar 2010.

[4] CARVALHO, A. M., et al. Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída, IV CITENEL, Araxá, 2007.

[5] NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇAO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA/UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - NEST/UNIFEI. Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 2ª etapa, UNIFEI, 2007.

[6] _____.Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 3ª etapa, UNIFEI, 2007.

[7] _____. Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 4ª etapa, UNIFEI, 2007.

[8] _____. Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 5ª etapa, UNIFEI, 2008.

[9] _____. Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 6ª etapa, UNIFEI, 2008.

[10] _____. Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório final, UNIFEI, 2009.

Capítulo 20

[1] REIS, R. J. dos. "Desenvolver um Sistema para Cálculo do Potencial de Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas e Termoelétricas Solares de Grande Porte". Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº GT 468. 2010.

[2] TIBA et al. "Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de dados terrestres". Editora Universitária de Pernambuco. Recife, PE, Brasil. 2001.

[3] DEFA - Divisão de Projeto de Fontes Alternativas da Chesf. Fontes Energéticas Brasileiras – Inventário/Tecnologias, Brascep Engenharia Ltda. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1987.

[4] PEREIRA, E. B., et al. "Atlas Brasileiro de Energia Solar". INPE. São José dos Campos, SP, Brasil. 2006.

[5] SILVA, C. H. F. da (Org.). "Alternativas Energéticas: Uma Visão Cemig". Cemig. Belo Horizonte, MG, Brasil.2012.

[6] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. "Cartilha de Alternativas Energéticas". Cemig. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2012.

[7] _____. "26º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais (BEEMG)". Cemig. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2012.

[8] Eletrosul. "Energia Solar Fotovoltaica". Disponível em: < http://www.eletrosul.gov.br/home/conteudo.php?cd=1151 >. Acesso em 22 nov. 2012.

[9] International Energy Agency. World Energy Outlook. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf >. Acesso em: 19 mai. 2011.

[10] Empresa de Pesquisa Energética. "Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira". EPE. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012

[11] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. "Plano de Trabalho anexo ao Convênio P&D GT 468". Belo Horizonte, MG, Brasil. 2010.

[12] _____. "Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais". Cemig. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2012.

Capítulo 21

[1] AGRELL, J.; BOGETOFT, P. "Economic and environmental efficiency of district heating plants", Energy Policy, 2005, pp. 1351–1362.

[2] BOSANAC, M.,. NIELSEN, J. "In situ check of collector array performance", Solar Energy, Vol. 59, Nr. 4-6, 1997, pp. 135-142.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto: projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2008.

[4] B.SKAGESTAD, P. MILDENSTEIN, District Heating and Cooling Connection Handbook, Programme of Re-search, Development and Demonstration on District Heating and Cooling, IEA, 86 p, 1999.

[5] BÄRBEL, Epp. Front-runners of solar district heating. Bruxelas: Global Solar Thermal Energy Council, 2008. Disponível em: <http://www.solarthermalworld.com> Acesso em: 14 jan. 2009.

[6] BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Balanço energético nacional. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2006. 150p.

[7] BRISCHKE, Lars-Arvid. German Cogeneration Policy and its Impact on District Heating. In: International IEA Conference - District Heating Policy in Transition Econo-mies, 2004, Praga, República Tcheca.

[8] CHRISTENSEN, C.; BURCH, J.. Monitoring ap-proaches for utility solar water heating projects. In: THE 1994 AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY ANNUAL CONFERENCE., 1994, San Jose, California. Anais…San Jose. American Solar Energy Society, 1994. p.261-266.

[9] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engi-neering of thermal processes. 2.ed., New York: John Wiley & Sons, 1991. 919 p.

[10] FANTINELLI, J. T.. Análise da evolução de ações na difusão do aquecimento solar de agua para habi-tações populares: estudo de caso em Contagem – MG. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[11] GEBREMEDHIN, A; MOSHFEGH, B. "Modelling and optimization of district heating and industrial energy sys-tem", International Journal of Energy Research, 2004, pp. 411–422.

[12] GUIMARÃES, F. M., "Avaliação pós-ocupaçãode uni-dades residenciais modificadas em um conjunto habita-cional em Maceió-AL". Tese de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UFAL, 2007.

[13] HELLER, A. 15 years of R&D in central solar heating In Denmark. Solar Energy, Lyngby, v.69, n.6, p.437–447, 2000.

[14] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. District heating and cooling connection handbook. Paris: IEA, 2001. 86p.

[15] LOTTNER,V.; SCHULZ, M.E.; HAHNE, E., Solar-assisted district heating plants: status of the German pro-gramme Solarthermie 2000, Solar Energy, Vol 69, No 6, pp 449-459, 2000.

[16] PEREIRA, E. M. D. et al. Curso de Capacitação em Aquecimento Solar: Projeto SolBrasil: manual do professor. Belo Horizonte: GREEN/PUC Minas, 2006.

[17] PEUSER, F. A.; REMMERS, K.H.; SCHNAUSS, M.. Análises del comportamiento a largo plazo de los sistemas solares térmicos. Sistemas Solares Térmicos – Diseño e Instalación, Berlim, 1.ed., cap.2, p.15-26, 2005.

[18] PROCEL/ELETROBRÁS,"Avaliação de Instalações de Aquecimento Solar no Brasil. Convênio ECV 184/2006.

[19] SOLAR ENERGY LABORATORY; UNIVERSITY OF WISCONSIN – MADISON. TRNSYS 16: a Transient System Simulation program: getting started. 2004. v.1.

Capítulo 22

[1] ZONDAG, H. A., "The yield of different combined PV-thermal collector designs", Eindhoven University of Technology, Netherlands, March 2003.

[2] ZONDAG, H. A., "Flat-Plate PV-Thermal Collectors and Systems: A Review", Energy Research Centre of the Netherlands, Netherlands, Dec. 2005.

[3] CHOW, T.T., "A Review on Photovoltaic/Thermal Solar Hybrid Solar Technology." Applied Energy, Hong Kog, China, July 2009.

[4] KIM, J. H., "The Experimetal Performance of an Unglazed PVT Collector with Two Different Absorber Types", Green Home Energy Technology Research Center, Kongju National University, Budae-Dong, Cheonan, Chungnam, South Korea.

[5] KATIC, I., Test of PV/T-module "SolarWall PVT", Solar Energy Center, Danish Technological Institute, Denmark, June 2007.

[6] DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W. A., "Solar Engineering of Thermal Process" 2nd ed, John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, New Jersey, 2006.

[7] NCROPERA, F. P., "Fundamentals of heat and mass transfer" 6th ed. John Wiley & Sons. Inc. 2007

[8] ZILLES, R., "Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica", Oficina de textos - São Paulo, 2012.

[9] TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., "Advanced solar colectors", Associate Professor in Physics Department, University of Patras, Greece, Feb 2009.

Capítulo 23

[1] NOGUEIRA, C. E. C. "Dimensionamento de Sistemas Integrados de Energia em Ambientes Rurais", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

[2] MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Programa Luz para Todos. Disponível em: <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp>. Acesso em: 27 mai. 2015.

[3] EPE – EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. "Balanço Energético Nacional 2014 - Ano base 2013", Empresa de Pesquisas Energéticas, Rio de Janeiro, 2014.

[4] ANTONIALI, S.; SANCHES, J.; NACHILUK, K. "Mais alimentos ou menos perdas" Disponível em: <http://www.infobibos.com/2009/idx.htm>. Acesso em: 26 mai. 2015.

[5] OTANICAR, T.; TAYLOR, R. A.; PHELAN, P. E. Prospects for Solar Cooling – An economic and environmental assessment. **Solar Energy**, vol. 86, Issue 5, pp 1287–1299, 2012.

[6] ZETZSCHE, M.; KOLLER, T.; MÜLLER-STEINHAGEN, H. Solar Cooling with an Ammonia/Water Absorption Chiller. **1st International Conference of heating cooling and building**. Lisbon, 2008.

[7] KIM, D. S.; INFANTE FERREIRA, C. A. Solar Refrigeration Options – A State-of-the-art Review. **International Journal of Refrigeration**, vol. 31, Issue 1, pp 3-15, 2008.

[8] SALES, L. S.; CARVALHO, R. D. M.; VENTURINI, O. J. Modeling and Simulation of a Solar-Powered Absorption Cooling Systems Located In Southeast Brazil. **Proceedings of the 18th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, Ouro Preto. 2005.

[9] PATEK,J.; KLOMFAR, J. Simple Function for Fast Calculation of Selected Thermodynamic Properties of Ammonia-water System.**International Journal of refrigeration**, vol. 14, pp. 228-234, 1994.

[10] SUN, D. W. Computer Simulation and Optimization of Ammonia-Water Absorption Refrigeration Systems. **Energy Sources Journal**, vol. 19, pp. 677-690, 1997.

[11] THRELKELD, J. L.; RAMSEY, J. W.; KUEHN, T. H. Thermal Environmental Engineering. 3ª ed., Prentice-Hall, 1998, p. 740.

[12] COSTA, E. C. Refrigeração. 3ª ed., Edgard Blücher, 1989, p. 321.

[13] NURZIA, G. "Design and Simulation of Solar Absorption Cooling Systems", Tese de doutorado, Univ. de Bergamo, 2008.

[14] FLORIDES, G. A. et al. Modeling and Simulation fo an Absorption Solar Colling System for Cyprus. **Solar Energy**, vol. 72, pp. 43-51, 2003.

[15] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd ed., John Wiley & Sons, 200, p. .

[16] COLONA, P.; GABRIELLI, S. Industrial Trigeneration Using Ammonia-water Absorption Refrigeration Systems (AAR), **Applied Thermal Engineering**, vol. 23, p. 381-386, 2003.

[17] ÁLVARES, S. G.; TREPP, C. H. Simulation of a Solar Driven Aqua-ammonia Absorption Refrigeration System - Part 2: viability for mild cooling at remote Brazilian dairy farms. **International Journal of Refrigeration,** vol. 10, p. 70-76, 1987.

Capítulo 24

[1] Waste Framework Directive. Council of the EU, 2008, Council Directive, 2008/98/EC.

[2] MURPHY, M. L. Waste-to-Energy Technology. Encyclopedia of Energy, Volume 6. r 2004 Elsevier Inc. All rights reserved.

[3] IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 2006

[4] KATHIRAVALE S. et al. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. Fuel Volume 82, Issue 9, June 2003, Pages 1119-1125.

[5] ACM0002: Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources --- Version 12.1.0. Disponível em:<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/C505BVV9 P8VSNN V3LTK1BP3OR24Y5L/view.html>. Acesso em 29 mar. 2011.

[6] ACM0002: Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources --- Version 12.1.0. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/C505BV V9P8VSNNV3LTK1BP3OR24Y5L/view.html>. Acesso em 29 mar. 2011.

[7] USEPA - U.S. Environmental Protection Agency, Landfill Methane Outreach Program. Landfill Biogas Recovery and Utilization at the Solid Waste Treatment Center BR-040 Belo Horizonte, Brazil: Final Assessment Report. Methane to Markets Contract: EP-W-06-22 TO 008 and 021. 2008.

[8] ALVES, J. W. S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP, 2000.

[9] CITIZENS, Clearinghouse on Waste Management Citizens, (2003). Disponível em: <http://CitizensWasteInfo.org/A559CA/ccwm.nsf/Is sues/incineration>. Acesso em 22 set. 2010.

[10] MCLANAGHAN, S. R. B. Delivering the Landfill Directive: The role of new & emerging technologies Report for the Strategy. Unit: 0008/2002. Associates in Industrial Ecology, Red Lion Cottage & Barn. Gamblesby Penrith, Cumbria. CA10 1HR. November 2002

[11] REIMANN D. O. Result of specific data for energy, efficiency rates and coefficients, plant efficiency factors and NCV of 97 European W-T-E plants and determination of the main energy results; CEWEP energy report (status 2001–2004) Updated July 2006. Bamberg, Germany.

[12] LEE, S. HighTemperature Corrosion Phenomena in Waste to Energy Boilers. Work submitted in partial fulfilment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences Columbia University, 2009

[13] CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Site: <http://www.ccee.org.br>. Acesso em 06 mai. 2010.

[14] ECX - European Climate Exchange. Emissions Prices. Disponível em: <www.ecx.eu >. Acesso em 20 nov. 2010.

[15] BCB – Banco Central do Brasil. Taxa Selic (ano). Disponível em:< http://www.bcb.gov.br>. Acesso em: 18 out. 2010.

[16] BOVE R., LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. Energy Conversion and Management 47 (2006) 1391–1401

[17] WANG, L. et al.. Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing. Renewable Energy 34 (2009) 2074–2079.

[18] MENDES L. G. G., SOBRINHO P. M. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá – FEG. Departamento de Energia – DEN. Rev. ciênc. exatas, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 71-76, 2005.

[19] LEME, M. M. V. Avaliação Ambiental opções tecnológicas para geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso. 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida de Produtos e Serviços. Florianópolis (SC), 2010.

[20] ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Genebra, 2006. 20p.

Capítulo 25

[1] BASU, Prabir. Biomass Gasification and pyrolysis: pratical design and theory. Oxford: Elsevier, 2010.

[2] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. Alternativas Energéticas: uma visão Cemig. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

[3] DUARTE, C. R. Energia da biomassa: pirólise rápida em leito fluidizado/jorro de rejeitos da agroindústria. Apresentação e notas de aula, UFU, 2009.

[4] Verti Ecotecnologias S.A. Relatório Técnico Projeto GT416 Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico da CEMIG - Etapa 01/02, Ano 01, Março de 2011.

[5] Verti Ecotecnologias S.A. Relatório Técnico Projeto GT416 Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico da CEMIG - Etapa 03, Ano 01,Março de 2011.

[6] Verti Ecotecnologias S.A. Relatório Técnico Projeto GT416 Desenvolvimento de processo e protótipos para craqueamento térmico para a conversão de resíduos poliméricos gerados no sistema elétrico da CEMIG, Agosto de 2012.

Capítulo 26

[1] Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. "Álcool combustível". Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=999> Acesso em 10 set. 2012.

[2] PINTO, C. P.. "Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável," Dissertação de Mestrado, Dept. de Energia, Univ. Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1999.

[3] BRASIL. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. "Etanol e Bioeletricidade: A cana de açúcar no futuro da matriz energética". Disponível em: <http://www.unica.com.br/search.asp> Acesso em 10 set. 2012.

[4] REGO, E. E., HERNANDEZ, F. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar. Contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006.

[5] ALBERS, M. Tratamento da Vinhaça: Concentração e Outros. Disponível em: < http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Position_paper_sessao4_monica_VS.pdf >. Acesso em: 10/11/2012 às 09:15h.

[6] LAIME, E. M. L. et al. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas V. 5, N. 3, pág. 16, 2011.

[7] WIKIPEDIDA. Biodigestão. Disponível em: < http://pt.wikipedia.org/wiki/Biodigest%C3%A3o >. Acesso em 10/11/2012 09:45h.

[8] Coulturato, L. F. D. Projeto conceitual de unidade de dessulfuração no âmbito do projeto Cemig GT 453. Relatório da Etapa 2 do Ano 1. 2012.

[9] TEIXEIRA, V.H. Biogás. Textos Acadêmicos. UFLA/FAEPE. Lavras, MG. 2003.

[10] Bailey, J. E., Ollis, D. F. Biochemical Engineering Fundamentals, McGraw Hill, England, 1986.

[11] SILVA, C. H. F., SOUZA, L. C. Biodigestão De Vinhaçaunidade Experimental Da Usina De Monte Alegre Relatório De Visita Técnica, Cemig GT, 2010

[12] COULTURATO, L. F. D..B. P&D GT 453. Projeto. 2010.

[13] KOHL A. AND NIELSEN R., 1997, Gas Purification, fifth ed., Gulf Publishing Company,Huston, Texas.

[14] COLEGIO WEB. A quimiossíntese das bactérias. Disponível em: < http://www.colegioweb.com.br/biologia/a-quimiossintese-das-bacterias-.html >. Acesso em 10/11/2012 às 13h.

[15] BIOENERGY CONSULT. PSA System for Biogas Upgradation. Disponível em: < http://www.bioenergyconsult.com/tag/pressure-swing-adsorption/ >. Acesso em 10/11/2012 às 13:15h.

[16] MENDIATA, L. F. F. Estudo da absorção de H2S e CO2 do gás combustível. Disponível em: < http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38371/000823865.pdf?sequence=1 >. Acesso em 10/11/2012 às 13:40 h.

[17] RICH AMINE LETDOWN. Soluções Fisher – Catálogo. Disponível em: < http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/brochures/d351234x0br.pdf >. Acesso em 10/11/2012 às 15 h.

[18] WIKIPEDIA. Osmose reversa. Disponível em: < http://pt.wikipedia.org/wiki/Osmose_inversa >. Acesso em 10/11/2012 às 13:30h.

[19] VELOSO E SILVA, C. A.B. Limpeza e purificação de biogás. Dissertação de mestrado. Universidade de Trás dos Montes e Alto Douro. 2009.

[20] FERNANDES, Wilson. "Projeto conceitual de unidade de dessulfuração no âmbito do projeto," Ambiente ½ Serviços Ambientais e Tecnologia Ltda, MG, Relatório Técnico. CEMIG GT-453, Mar. 2012.

[21] ANÁLISE EDITORIAL. Análise Energia 2012. Análise. 2012.

Capítulo 27

[1] Pereira, E. M. D. "Projeto de P&D 185 – Potencial de Cogeração no setor siderúrgico". Projeto de pesquisa, 2004

[2] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. “Plano Decenal de Energia - PDE 2019”. Disponível em: < http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx > . Acesso em 20/12/2012.

[3] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Balanço Energético do Estado de Minas Gerais 2008 Ano Base 2007. CEMIG, 2008.

[4] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro, 2006.

[5] IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. “Anuário Estatístico.” Site do IBS. s.d. Anuário Estatístico 2007. Rio de Janeiro: IBS, 2007.

[6] SINDIFER - Sindicado da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais. “Anuário 2007.” Site do Sindifer. s.d www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html (acesso em 03 março de 2008).

[7] DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. “Sumário Mineral 2007.” Site do DNPM. s.d. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2007/Aco_SM2007.doc>. Acesso em: 31 de março de 2008.

[8] SILVA, A. M. da. “Avaliação do Potencial Energético de Gases Residuais da Indústria Siderúrgica para Aplicação em Sistemas de Cogeração”. Relatório Final do Projeto, 2008.

[9] LI, Kam W. Applied Thermodynamics: Availability Method and Energy Conversion. North Dakota: Taylor & Francis, 1996.

[10] MACIEL, Carlos Renato França. Análise Energética e Exergética de Uma Central Termelétrica. Ouro Preto: 18º International Con-gress of Mechanical Engineering, 2005.

Capítulo 28

[1] ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. 2013. Anuário estatístico 22: ano base 2012. Belo Horizonte, 2013.

[2] BARCELOS, D. C. et al. Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica com microturbinas. In: VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL. 2013.

Capítulo 29

[1] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. 26º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/Inovacao/AlternativasEnergeticas/Documents/26BEEMGcc.pdf>. Acesso em: 09 de nov. 2012.

[2] INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - INEE. Disponível em: < www.inee.org.br/down.../1115PauloCPinheiro%20UFMG.pdf >. Acesso em: 02 de out. 2012.

[3] UHLIG, A. “Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo”. Tese, USP, São Paulo, 2008.

[4] BARCELOS, D. C., AMARAL, B. “Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica com microturbinas”. Projeto de pesquisa submetido ao Edital de Captação Cemig/IEL, 2009.

[5] ArcelorMittal Bioflorestas. Relatório de Produto de Projeto – Etapa 1. Relatório Técnico P&D GT358. Fev. 2011.

[6] ArcelorMittal Bioflorestas. Relatório de Produto de Projeto – Etapa 2. Relatório Técnico P&D GT358. Nov. 2011.

[7] ArcelorMittal Bioflorestas. Relatório de Produto de Projeto – Etapa 3. Relatório Técnico P&D GT358. Dez. 2011.

[8] ArcelorMittal Bioflorestas. Relatório de Produto de Projeto – Etapa 4. Relatório Técnico P&D GT358. Jul. 2012.

[9] ArcelorMittal Bioflorestas. Relatório de Produto de Projeto – Etapa 6. Relatório Técnico P&D GT358. Out. 2012.

[10] ArcelorMittal Bioflorestas. Relatório de Produto de Projeto – Etapa 5. Relatório Técnico P&D GT358. Dez. 2012

Capítulo 30

[1] MULLER, M. D.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no município de Itamarandiba – MG. Biomassa & Energia, v. 2, n. 2, p. 91-101, 2005.

[2] VALE, A. T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos a agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Jerônimo Monteiro – ES: 2008. p. 196-246.

[3] PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

[4] SOUZA, M. M. et al. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduo da colheita e do processamento de Pinus taeda. Floresta, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.

[5] CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

[6] PINCELLI, A. L. P. S. M. Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética. 2011, 125 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.

[7] PAES, F. A. S. V. et al. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 37, p. 1081-1090, 2013.

[8] DEDECEK, R. A.; BELLOTE, A. F. J. Uso de Resíduos de Colheita e Industriais em Plantações de Eucaliptos. Embrapa Florestas. Comunicado Técnico 221, Colombo, 2008.

[9] LEINONEN, A. Harvesting technology of forest residues for fuel in the USA and Finland. Espoo, 2004. 132 p. (VTT Tiedotteita. Research Notes, 2229).

[10] LIMA, A. P. B. Caracterização de três sistemas de colheita de resíduos de exploração florestal para fins de carbonização em áreas manejadas da Amazônia brasileira. 2011, 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Belém, 2011.

[11] PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. Biomassa e Energia, v. 2, n. 2, p. 113-123, 2005.

[12] Barcelos, D. C. et al. Tecnologias integradas de transporte de gás de carbonização de biomassa e beneficiamento de subprodutos para cogeração de energia elétrica com microturbinas. In: VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – Citenel. 2013

[13] SILVA, C. H. F. ; BUENO, A. F. M. ; Cunha, W. L. P. ; CARNEIRO, A. C. O. . Cogeração usando gases residuais da carbonização: uma oportunidade energética. Revista SME (Sociedade Mineira de Engenheiros), Belo Horizonte, , v. 26, p. 54 – 56. 2014.

[14] SIVLA, J. V. et al. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, n.11, p.1555-1562, 2012.

[15] CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. Mensuração florestal: perguntas e respostas. 4.ed. Viçosa-MG: UFV, 2013. 605 p.

[16] VITAL, B. R. Métodos de determinação de densidade da madeira. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.

[18] REIS, A. A. et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus urophylla em diferentes locais de plantio. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

[19] NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

[20] BRITO, J. O. et al. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. IPEF, n. 23, p. 53-56, 1983.

[21] OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de Eucalyptus saligna Sm. Revista Árvore, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

[22] OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell.. Scientia Forestalis, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

[23] SANTOS, R. C. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. 2010, 173 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

[24] CASTRO, A. F. N. M. Efeito da idade e de materiais genéticos de Eucalyptus sp. na madeira e carvão vegetal. 2011. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

[25] ROCHA, M. F. V. Influência do espaçamento e da idade na produtividade da madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus camaldulensis para energia. 2011, 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

[26] PEREIRA, J.C.D. et al. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

[27] QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Within and between-tree variaton of bark content and wood density of eucalyptus globulus in comercial plantations. IAWA Journal, v. 22, n. 3, p. 255-265, 2001.

[28] QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. Revista da Madeira, n. 89, p. 100-106, 2005.

[29] COUTO, H. T. Z. et al. Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de Eucalyptus saligna. IPEF, n.26, p.19-23, abr.1984.

[30] RAAD, T. J. Simulação do processo de secagem e carbonização de Eucalyptus spp. 2004. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

[31] VITAL, A. R. T. et al. Biogeoquímica de uma microbacia após o corte raso de uma plantação de eucalipto de 7 anos de idade. Scientia Forestalis, n. 55, p. 17-28, 1999.

[32] CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S. Ciclagem de nutrientes em Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden no norte fluminense. Revista Árvore, Viçosa, v.29, n.3, p.353-363, 2005.

[33] PEDRINI, D. C.; TEN CATEN, C. S. Modelagem estatística para a previsão do teor de fósforo em ligas de Ferromanganês. INGEPRO – Inovação, Gestão e Produção Fevereiro de, v. 2, n. 2, 2010.

[34] SANTOS, M. A. S. Parâmetros da qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: Fórum nacional de carvão vegetal. 2008, Belo Horizonte. Disponível em: <painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784>. Acesso em: 31 Maio, 2009.

[35] ROSA, R. A. et al. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. Journal of Biotecnology and Biodiversity, v. 3, n.2, p. 41-48, 2012.

Capítulo 31

[1] COBAS, V. R. M.. "Relatório Parcial 1- P&D 237 – Revisão Bibliográfica". NEST/Unifei. Ago. 2008.

[2] KORENS, N.; SIMBECK, D. R.; WILHELM, D. J.. "Process screening analysis of alternative gas treating and sulfur removal for gasification". U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, Pennsylvania : s.n., 2002. p. 104, Final Report NETL Project.

[3] ARAVIND, P.V. et al. "Impact of Biosyngas and its Components on SOFC Anodes". 2005, Electrochemical Society Proceedings, Vol. 7, pp. 1459-1467.

[4] BLOMEN, L. J. M. J.; MUGERWA, M. N. (Eds). Fuel Cell Systems. New York. Plenum. 1993.

[5] MARTINEZ, J. D.. “Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 2009.

[6] LV, P. et al. “Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier”. Renewable Energy, Vol. 32, pp. 2173-2185. 13, 2007.

[7] BRIDGWATER, A.V.. “The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation”. Fuel, Vol. 74, pp. 631-653. 5, 1995.

[8] RAPAGNÁ, S. et al. “Development of catalysts suitable for hydrogen or syn-gas production from biomass gasification”. Biomass and Bioenergy, Vol. 22, pp. 377-388, 2002.

[9] STOPPIELLO, G.. “Biomass Gasification - Process analysis and dimensioning aspects for downdraft units and gas cleaning lines”. University of Bologna. p. 167, PhD Thesis, 2010.

[10] SKOBLIA, S. et al. “Hot gas cleaning for biomass gasification for clean gas production”. International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies, 2005.

[11] DASAPPA, S. et al. Produzer gas engines-proponent of gas clean energy technology. Berlin : s.n. 15th European Biomass Conference and Exhibition. pp. 1-5. 2007.

[12] VAN PAASEN, S.V.B., KIEL, J.H.A.. “Tar formation in fluidised-bed gasification - impact of gasifier operating conditions. Rome” : s.n., The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 2004.

[13] MARTÍNEZ, J.D. et al. “Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor”. Biomass and Bioenergy, pp. 1-17, 2011.

[14] JAOJARUEK, K. et al. “Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer gas quality through an innovative two-stage air and premixed air/gas supply approach”. Bioresource Technology, Vol. 102, pp. 4834–4840, 2011.

[15] BHATTACHARYA, S.C. et al. A study on wood gasification for low-tar gas production. Energy, Vol. 24, pp. 285-296, 1999.

[16] DAYTON, D.C.. “Fuel Cell Integration – A Study of the Impact of Gas Quality & Impurities”. National Renewable, NRL. 2001. Milestone Completion Report NREL/MP-510-30298.

[17] ARAVIND, P. V. et al. “Impact of Biomass-Derived Contaminants on SOFCs with Ni/Gadolinia-Doped Ceria Anodes. 2”, Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. 11, pp. B24-B28, 2008.

[18] BOERRIGTER, H, et al. "OLGA" tar removal technology. s.l. : ECN, 2005. Report ECN-C--05-009.

[19] GOLESWORTHY, T.. “A review of industrial flue gas cleaning (2)”. Filtration and Separation, Vol. 36, pp. 24-27. 5, 1999.

[20] COBAS, V. R. M.. “D237 - Avaliação teórico-experimental da gaseificação de biomassa para o acionamento de células a combustível de óxido sólido (SOFC)”. Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel. 2006

[21] SILVA, C. H. F. da, . Microturbinas A Gás, Motores Stirling E Células A Combustível Para Geração Distribuída. CITENEL, 2007.

[22] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. “Plano de Trabalho P&D 237 – Anexo ao Convênio”. 2008.

[23] COBAS, V. R. M.. “Relatório Parcial 2- P&D 237 -Simulação”. NEST/Unifei. Mai. 2009.

[24] _____. “Relatório Parcial 3- P&D 237 – Construção do gaseificador”. NEST/Unifei. Dez. 2008.

[25] _____. “Relatório Parcial 4- P&D 237- Testes preliminares”. NEST/Unifei. Dez. 2008.

[26] _____. “Relatório Parcial 5- P&D 237- Análise do gás de gaseificação”. NEST/Unifei. Mar. 2010.

[27] _____. “Relatório Parcial 5- P&D 237- Análise do gás de gaseificação”. NEST/Unifei. Out. 2010.

[28] _____. “Relatório Parcial 5- P&D 237- Projeto do sistema de limpeza”. NEST/Unifei. Out. 2010.

[29] _____. “Relatório Parcial 5- P&D 237- Construção do sistema de limpeza”. NEST/Unifei. Fev. 2012.

[30] NEEFT, J.P.A.. “Rationale for setup of impinger train as used in the technical specification of sampling and analysis of tar and particles in teh product gases of biomass gasification”. Netherlands : s.n., p. 14, Report CEN-BT/TF 143, 2005.

[31] EG&G Technical Services, Inc. Fuel Cell Handbook. 7th. Morgantown : s.n., 2004.

[32] MARINA, O.A. et al. “Reversible poisoning of nickel/zirconia solid oxide fuel cell anodes by hydrogen chloride in coal gas”. Journal of Power Sources, Vol. 195, pp. 7033-7037, 2010.

[33] BAO, J. et al. “Effect of various coal contaminants on the performance of solid oxide fuel cells: Part I. Accelerated testing”. Journal of Power Sources, Vol. 193, pp. 607-616, 2009.

[34] CHUNG, J.; HWANG, T.; PARK, S.. Filtration and dust cake experiment by ceramic candle filtering high temperature conditions. Korean J.l Cem. Eng., Vol. 20, pp. 1118-1122. 6, 2009.

[35] SHARMA, S.D. et al. A critical review of syngas cleaning technologies — fundamental limitations and practical problems. Powder Technology, Vol. 180, pp. 115-121. 1-2, 2008.

Capítulo 32

[1] LOPES, B. M. E VASCONCELOS, J.A., “Desenvolvimento de Centrais Eólicas Adaptadas às Condições de Vento do Estado de Minas Gerais”, Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, ciclo 2005/2006, P&D-234

[2] DOERNER, H., Wind Energy Utilization: General View, Possibilities and Limitations – Visita ao CETEC, 1987.

[3] BERGEY, M., Turbines Planned for World Bank Project in Brazil – Wind Energy Weekly, Vol. 15, Nº 679, 1996.

[4] PATEL, M. R., "Wind and Solar Power Systems" - ISBN 0849316057, CRC Press, 1999.

[5] THRESHER, R. W., DODGE, D. M., Trends in Evolution of Wind Turbine Generator Configuration and Systems – USA, Wind Energy, 1998.

[6] COTRELL. J., The Mechanical Design, Analysis and Testing of a Two Blades Wind Turbine Hub – NREL/TP-500-26645, 2002.

[7] HAND, M. M. BALAS, M. J., Systematic Controller Design Methodology for Variable-Speed Wind Turbines – NREL/TP-500-29415, 2002.

[8] MAYER, R. M., Design of Composite Structures Against Fatigues - Applications to Wind Turbines Blades - ISBN 0852989571, Mechanical Engineering Publications Limited, Inglaterra, 1996.

[9] HEIER, S., Grid Integration of Wind Energy Conversion System - John Wiley & Sons, 1998.

[10] CHEN, Y., PILLAY, P.; KHAN, A.; PM Wind Generator Topologies - IEEE Transaction on Industry Applications, Volume 41, Issue 6, Nov. – Dec. 2005 Pages: 1619-1626.

[11] Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB/CEPEL, 2001.

[12] DO NASCIMENTO, C.A.M., VALLE, R. M., "Introdução do estudo da camada limite atmosférica em projeto de linhas aéreas", Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, ciclo 2002/2003, P&D-063

[13] DO NASCIMENTO, C.A.M., VALLE, R. M., "Desenvolvimento e otimização de modelos de camada limite atmosférica para aplicação em projeto de linhas aéreas", Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, ciclo 2005/2006, P&D-22

CEMIG
A Melhor Energia do Brasil.

MINAS GERAIS
GOVERNO DE TODOS

P&D ANEEL